

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Katedra fyzické geografie a geoekologie



Bc. Nikol Zelíková

**Potenciál revitalizačních opatření vodních toků
jako nástroje pro retenci vody v říční nivě**

Potential of watercourses restoration measures as a tool for water retention in the floodplain

Diplomová práce

Vedoucí práce: RNDr. Milada Matoušková, PhD.

Praha, 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 31. 7. 2019

Podpis studenta:

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala své vedoucí práce RNDr. Miladě Matouškové, Ph.D. za vstřícnost, věnovaný čas a cenné rady poskytnuté při vedení této práce. Srdečné poděkování za odborné posouzení práce a velmi přínosné konzultace patří také Ing. Romaně Slámové, Ph.D., vědecké pracovníci Ústavu pro hydrodynamiku Akademie věd České republiky. Ráda bych také poděkovala své rodině a přátelům za jejich podporu.

Zadání diplomové práce

Název práce:

Potenciál revitalizačních opatření vodních toků jako nástroje pro retenci vody v říční nivě.

Cíle práce:

Hlavním cílem práce je zhodnocení potenciálu revitalizačních úprav drobných hydrotechnických staveb a říční nivy na zvýšení retence vody v říční nivě v zájmovém povodí Rožnovské Bečvy za využití 2D hydraulického modelu HEC–RAS. Jako drobné hydrotechnické stavby jsou v této práci považovány protékané náhony, které již neslouží své původní funkci.

Použité pracovní metody, zájmové oblasti, datové zdroje:

1. Rešerše zahraniční a domácí odborné literatury na danou problematiku
2. Fyzicko–geografická charakteristika zájmového území
3. Zhodnocení vodohospodářských plánů v zájmovém povodí vzhledem k záměrům zvýšení retence vody v říční nivě
4. Návrh revitalizačních opatření úpravou DMR a návrhem změn land use
5. Simulace navržených úprav ve 2D hydraulickém modelu HEC–RAS

Datové zdroje: odborná literatura, mapové podklady, DMR 5G, DIBAVOD, ČHMÚ, informace od správců vodních toků a terénní průzkum

Datum zadání: 19. 12. 2014

Jméno studenta: Bc. Nikol Zelíková

Podpis studenta:

Jméno vedoucí práce: RNDr. Milada Matoušková, Ph.D.

Podpis vedoucí práce:

Abstrakt

Cílem předkládané diplomové práce je zhodnocení potenciálu revitalizačních opatření drobných hydrotechnických staveb na zvýšení retence vody v říční nivě za využití 2D hydraulického modelu HEC–RAS. Pro návrh revitalizačních opatření byl zvolen úsek Rožnovské Bečvy s již nevyužívaným vodním náhonem, jehož část je využita jako revitalizační prvek. Návrh se skládá z úpravy části současného náhonu a návrhu nového přírodě blízkého koryta v zemědělsky využívané říční nivě. Dále návrh zahrnuje změny land use (zatravnění a zalesnění). Jako data vstupující do hydraulického modelu byly využity digitální model reliéfu (5G) poskytnutý ČÚZK, drsnostní parametry povrchu a průměrné hodinové průtoky povodňových situací z roku 1997 (Q_{100}) a 2007 (Q_5) získané z ČHMÚ. Výsledky simulací poukazují na pozitivní vliv revitalizačních návrhů především v trojnásobném zvýšení zatopených objemů a dvojnásobném zvětšení zaplavených ploch. Z analýz těchto proměnných vyplývá, že díky aplikaci revitalizačních opatření došlo k vyběžení nově navrženého koryta ještě před inundací z regulovaného koryta Rožnovské Bečvy, což může vést k četnějšímu výskytu událostí příznivých pro retenci vody v říční nivě.

Klíčová slova: retence, říční niva, revitalizace, hydrotechnické stavby, Rožnovská Bečva, vodní náhon, HEC–RAS, 2D hydraulické modelování

Abstract

The object of this thesis is the evaluation of the restoration potential of small hydraulic structures for increasing water retention in river floodplain by using 2D HEC–RAS hydraulic model. A former millrace of the Rožnovská Bečva River was used for the design of restoration measures. The restoration proposal consists of partial modification of the current millrace and new close-to-nature watercourse in the agricultural floodplain. Restoration proposal also includes changes in land use, which consist of grassing and afforestation. The input data used for the hydraulic model are digital terrain model (5G) by ČÚZK, surface roughness parameter and mean hourly discharge data of 1997 (Q_{100}) and 2007 (Q_5) flood events provided by CHMI. The results of the hydraulic simulations point to the positive effect of proposed restoration measures especially in the change of flooded volumes (3x higher) and flooded areas (2x higher). The results indicate that restoration measures lead to the flooding from the newly designed watercourse that precedes the flooding from the Rožnovská Bečva River. This brings the possibility of more frequent occurrence of inundation events favourable for water retention in the river floodplain.

Keywords: retention, floodplain, restoration, hydraulic structures, Rožnovská Bečva River, water mill race, HEC–RAS, 2D hydraulic modelling

Obsah

1. ÚVOD A CÍLE PRÁCE	9
2. TEORETICKO-METODOLOGICKÝ ÚVOD	10
2.1 Retence vody v říční nivě	10
2.1.1 Procesy uplatňující se při retenci vody v říční nivě.....	11
2.2. Příčiny a projevy změn přirozené retence vody v říční nivě.....	14
2.2.1. Lidský faktor	14
2.2.2. Klimatický faktor.....	17
2.3. Přístupy a opatření pro zvýšení retenční schopnosti říční nivy	19
2.4. Hydraulické modelování.....	21
2.4.1. Základy hydraulického modelování	21
2.4.2. 2D simulace v programu HEC-RAS.....	24
2.5. Aplikace revitalizačních opatření a hydraulických modelů ve výzkumu podpory zvýšení retence vody v říční nivě	26
3. FYZICKO-GEOGRAFICKÉ POMĚRY ZÁJMOVÉHO POVODÍ	29
3.1. Geologické a geomorfologické poměry	30
3.2. Klimatické a hydrologické poměry.....	32
3.2.1. Odtokové poměry	35
3.3. Půdní a vegetační poměry.....	45
3.4. Využití území.....	46
3.5. PROBLEMATIKA RETENCE V ŘÍČNÍ NIVĚ V POVODÍ ROŽNOVSKÉ BEČVY	48
3.5.1. Možné příčiny ovlivňující míru retence vody v říční nivě	48
3.5.2. Výsledky návrhů opatření plánů Povodí Moravy, Studie Zlínského kraje a územních plánů obcí týkající se problematiky retence vody v říční nivě.....	56
4. APLIKOVANÉ METODY A ZDROJE DAT	60
4.1. Výběr modelovaného úseku a návrhy revitalizačních úprav	61
4.1.1. Výběr zájmového území.....	61
4.1.2. Návrh revitalizačních úprav	62
4.2. Modelování vlivu revitalizačních úprav na zvýšení retence vody v říční nivě.....	66
4.2.1. Geometrie modelu	66
4.2.2. Simulace neustáleného proudění	70
4.3. Analýza výsledků.....	72
4.3.1. Změna zatopených objemů.....	72
4.3.2. Změna plochy zaplavení.....	74
4.3.3. Změny ve výšce hladin v korytě.....	74
4.3.4. Změna rychlostí proudění.....	75
4.3.5. Transformace kulminačních průtoků.....	75
4.4. Zhodnocení nejistoty modelu.....	75

5.	VÝSLEDKY	77
5.1.	Vybraná lokalita a návrhy revitalizačních úprav	77
5.1.1.	Výběr lokality a její charakteristika	77
5.1.2.	Návrh revitalizačních úprav	82
5.2.	Výsledky hydraulického modelování v programu HEC-RAS.....	90
5.2.1.	Analýza změn objemů	90
5.2.2.	Analýza změn plochy rozlivů.....	94
5.2.3.	Analýza změn nadmořských výšek hladin	98
5.2.4.	Analýza změn rychlostí proudění v korytě.....	102
5.2.5.	Analýza změn kulminačních průtoků	108
6.	DISKUSE	114
7.	ZÁVĚR.....	119
8.	LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE	121
8.1.	Literatura.....	121
8.2.	Elektronické zdroje.....	128
8.3.	Mapové služby	129
9.	SEZNAM GRAFICKÝCH PRVKŮ	131
9.1.	Seznam obrázků.....	131
9.2.	Seznam tabulek.....	134
9.3.	Seznam příloh	135
10.	PŘÍLOHY	137

Seznam zkratek

DMR	Digitální model reliéfu
DMT	Digitální model terénu
ETa	Aktuální evapotranspirace
ETr	Referenční evapotranspirace
GIS	Geografický informační systém
CHOPAV	Chráněná oblast přirozené akumulace vod
IIPO	Druhé plánovací období
IPCC	Mezivládní panel pro změnu klimatu (Intergovernmental Panel on Climate Change)
LAI	Index listové plochy (leaf area index)
LU	Využití půdy (land use)
NPR	Národní přírodní rezervace
PBPPO	Přírodě blízká protipovodňová opatření
PDP	Plán dílčích povodí
PPO	Protipovodňová opatření
PR	Přírodní rezervace
PZPR	Plány pro zvládání povodňových rizik
PZV	Podzemní voda
SPA	Stupeň povodňové aktivity
TTP	Trvalý travní porost
ÚP	Územní plán
VD	Vodní díla
WFD	Rámcová směrnice EU o vodní politice (Water Framework Directive)

1. Úvod a cíle práce

Problematika retence vody je v posledních letech čím dál častějším tématem, které je zkoumáno napříč vědními obory. Jednou z oblastí podněcující zájem o toto téma je snaha popsat dopady hospodářské proměny krajiny a jejího intenzivního využívání na změnu přirozených odtokových procesů projevujících se především v podobě urychleného odtoku (FOHRER et al., 2007; DOSTÁL et al., 2012a; LANGHAMMER, 2007; PITHART, 2015). Umocnění zájmu je navíc v posledních letech zapříčiněno predikcemi klimatických změn, které předpovídají nárůst odtoku v období zimních měsíců a pokles odtoku během teplého půlroku, včetně zintenzivnění extrémních hydrologických jevů (BRÁZDIL, TRNKA, 2015; HANEL et al., 2011; HUNTINGTON, 2006). Mezi jedny z dotčených prvků krajiny patří také říční nivy, které byly za posledních sto let výrazně postiženy regulacemi vodních toků a intenzivním využíváním nivních půd. Snahy o snížení pozorovaných i předpovídaných dopadů našly místo také v legislativních dokumentech, které upozorňují na potřebu obnovení přirozeného vodního režimu jak říčních niv, tak celé krajiny. Jako jedno z hlavních opatření podporující tyto snahy jsou uváděny komplexní revitalizace vodních toků a říčních niv (ES, 2000; EC, 2013; MŽP, 2015).

Kromě empirických zkušeností je efektivita revitalizačních opatření často zkoumána za využití nástrojů numerického modelování, které umožňují posoudit vliv morfologických změn na povrchový odtok v prostoru říční nivy a možnosti zvýšení její retenční kapacity.

Téma této diplomové práce volně navazuje na dílčí výsledky bakalářské práce autorky (ZELÍKOVÁ, 2014), které se týkaly inventarizace vodních náhonů v povodí Rožnovské a Vsetínské Bečvy.

Hlavním cílem diplomové práce je zhodnocení potenciálu návrhů revitalizačních úprav ve vybraném úseku Rožnovské Bečvy za využití bývalého vodního náhonu na zvýšení retence vody v říční nivě pomocí 2D hydraulického modelu HEC–RAS. Navrhované úpravy se řídí zásadami revitalizačních přístupů podporujících přírodě blízký charakter koryta, který mimo jiné vede k obnovení komunikace mezi korytem a říční nivou a častějšímu výskytu inundačních situací příznivých pro retenci vody a zpomalení jejího odtoku. (JUST, 2005; PITHART, 2015; MATOUŠKOVÁ, 2007) Vyhodnocení výsledků simulací vlivu revitalizačních návrhů bylo provedeno analýzou vybraných proměnných, kterými jsou zatopené objemy a zaplavené plochy v říční nivě, změny rychlostí a výšek hladin v korytě Rožnovské Bečvy a transformace povodňových průtoků.

2. Teoreticko-metodologický úvod

2.1 Retence vody v říční nivě

Říční niva představuje komplexní ekosystém, který nepochybně patří k vodním tokům a nabízí potenciál pro řadu ekosystémových funkcí, které s sebou nesou význam také pro lidskou společnost (MATOUŠKOVÁ, 2007; PITHART, 2015). Mezi tyto funkce jsou řazeny samočistící schopnost vody, která je podmíněna zpomalením transportu živin do níže položených částí povodí, stabilizace koloběhu uhlíku, podpora rozvoje biodiverzity, regulace okolní teploty či přirozený potenciál k tlumivému rozlivu povodní zpomalující odtok vody z krajiny (PLATE, 2002; JANSKÝ, TUREK, 2012; PITHART, 2015; MATOUŠKOVÁ, 2007; Millenium Ecosystem Assessment, 2005). Právě posledními funkcemi říční nivy týkající se retence vody se zabývá tato kapitola.

Potenciálem říčních niv zadržovat vodu se zabývá řada zahraničních i tuzemských autorů. Chápání pojmu retence vody v říční nivě se však mezi jednotlivými studiemi může lišit podle jejich zaměření. Jako retenční kapacita říčních niv je v řadě studií chápán objem vody, který může být po krátkou či delší dobu zadržen v záplavové oblasti (VALENTOVÁ et al. 2010; JUST, 2003; PITHART, 2015; CZECH et al., 2016). Jedná se především o studie zkoumající transformační účinek říční nivy na povodňové průtoky, který se uplatňuje převážně vlivem dostupného inundačního prostoru (VALENTOVÁ et al. 2010; THOMAS, NISBET, 2007). Neopomíjen je také retenční potenciál v podobě pasivní retence (DOSTÁL et al., 2012a) či z pohledu funkce půdy, kdy je možné retenční potenciál uvažovat jako synonymum k retenční kapacitě nivních půd (LICHNER et al, 2004; DOSTÁL et al., 2012a; CLILVERD et al., 2016).

Z českých autorů, kteří se zabývají problematikou retenčního a transformačního potenciálu říčních niv je vhodné uvést vědeckou skupinu mezioborového projektu prováděného na úseku zachované přírodní nivy horní Lužnice, studující jak popis hydrologických procesů v nivách a jejich význam pro retenci vody, tak i metody posuzující retenční kapacitu říčních niv (DOSTÁL et al., 2012a; JANSKÝ, TUREK, 2012; DAVID, 2012; SNĚHOTA, ŠANDA, 2012; VALENTA et al. 2012). V projektu byla hodnocena interakce povrchových a podzemních vod v nivách za využití hydrologických a geodetických dat z terénních měření, dále byly hodnoceny proměnné ovlivňující transformaci povodní v říční nivě, mezi které patřilo hodnocení pasivní retence za využití metod GIS, evapotranspirace a retence v půdách za pomoci expertních odhadů a laboratorních metod, a na závěr pomocí metod hydraulického modelování byla zkoumána transformace průtoků a změn zatopených objemů v nivě.

Mezi hlavní zkoumané parametry ovlivňující jak retenční schopnost říční nivy, tak celých povodí jsou řazeny změny využití půdy (land use) a regulace řek, které pro svůj prostorový dopad nalezly místo také v zahraniční literatuře. Ze studií zabývajících se dopady změn land use na povrchový odtok v měřítku celých povodí je možné zmínit např. studie Klöckingové a Haberlandta (2002), Froherové et al. (2001) či Niehoffa et al. (2002). Studie se shodují především na významném vlivu měřítka povodí a rozsahu změn land use, které se v povodí odehrály. Nadregionální povodí (100 000 km² a více) disponují schopností změny ve využití půdy vlivem své velikosti

a komplexnosti vyrovnat, naproti tomu regionální povodí jsou na změny land use v projevech odtoku mnohem citlivější. Důraz v problematice vlivu land use je vzhledem k současnému zemědělsky využívanému stavu krajiny kladen především na vliv zalesnění, případně revitalizačních opatření (např. podpora růstu lužních lesů) v říčním prostoru (STŘEDA et al., 2008; CLILVERD et al., 2016). Výsledky sice poukazují na pokles odtoku během letního období, ten je však úměrný k rostoucí evapotranspiraci. Studie tak upozorňují na možné riziko při nízkých průtocích v období sucha. Dopady změn land use v prostoru samotné říční nivy jsou uvedeny např. ve studiích Thomase a Nisbeta (2007), Raka et al. (2016) a Valentové et al. (2010), které se zaměřují na ovlivnění povodňových průtoků. Po zalesnění prostoru říční nivy uvádějí studie pozitivní dopad na transformaci a zpomalení povodně, a tedy i odtoku ze zkoumaného úseku. Společně se změnami land use v říční nivě je často zkoumán vliv regulace vodních toků na průběh povodní. Hlavním problémem se jeví omezení komunikace mezi korytem a prostorem přilehlé nivy, které je způsobeno převážně zahloubením nebo ohrázováním koryta. Z vybraných studií Czech et al. (2016), Schober et al. (2015), Škarpich et al. (2016b), Valentová et al. (2010) je možné usuzovat na dopady v podobě urychleného odtoku, vzrůstu kulminačních průtoků i poklesu hladin podzemních vod. V opačném případě přirozeného stavu toku jsou zaznamenávány zvýšené rozsahy zaplavených ploch v říční nivě, nárůst hladin podzemních vod i transformace povodňových vln. U řady studií je zároveň patrný jev, kdy vliv jakýchkoliv úprav koryt i říčních niv klesá s rostoucí extremitou povodní (DOSTÁL et al., 2012a; SCHÖBER et al., 2015; KRAHE et al., 2002), pro kterou udává Langhammer (2007) kritickou limitu 5 až 20 leté vody. Hodnoty této hranice se však mohou lokálně lišit v závislosti na geografických charakteristikách povodí a podle intenzity a prostorového rozložení příčinných srážek.

2.1.1 Procesy uplatňující se při retenci vody v říční nivě

Na transformaci průtoků a retenci vody v říční nivě se podílí souhra několika procesů, které se uplatňují ve větší či menší míře. Jmenovitě se jedná o pasivní retenci, retenci v půdách a transformaci průtoků v prostoru samotné říční nivy.

Pasivní retence říční nivy

Pasivní retence nachází uplatnění především během zvýšených hladin v korytě a povodňových událostech. Tehdy může docházet k zaplnění terénních bezodtokých depresí, ať už shora po vylití vody z koryta a zaplavení říční nivy či průsakem propustnými nivními sedimenty. Zadržaná voda se poté buď odpaří, infiltruje nebo dotuje zpětně průtok vody v korytě. (DAVID, DOSTÁL et al., 2012; KRAUSE et al., 2007). Mezi takovéto deprese mohou být řazeny mělké sníženiny, slepá říční ramena či aluviální jezera, kterých se však v obhospodařované říční krajině nachází jen minimum. Na druhé straně v přírodě blízkých nivách, kde lze s významnějšími tůňmi počítat, je volný prostor v tůňích minimální v důsledku výskytu hladiny podzemní vody blízko povrchu. Jejich podíl na zadržení vody po opadnutí inundace, je tak pouze v jednotkách procent a v případě obhospodařovaných niv může být ještě menší. Na druhou stranu přítomnost zadržené vody

v depresích může zvyšovat zásobu vody v době jejího nedostatku (DAVID, DOSTÁL et al., 2012).

Retence v půdách říční nivy

Půdy říčních niv představují médium pro komunikaci mezi povrchovou vodou v korytě a podzemní vodou v říční nivě, která intenzivně probíhá laterálním pohybem skrze břehovou infiltraci. Směr proudění se řídí jednoduchou závislostí mezi vzájemnými polohami hladin jednotlivých prostředí. V případě vyšší polohy hladiny v korytě dochází k dotaci podzemních vod, v případě vyšší polohy hladiny podzemních vod je dotováno koryto toku. Tyto vertikální výkyvy hladin se snižují s narůstající vzdáleností od koryta (KRAUSE et al., 2007; JANSKÝ, TUREK, 2012). Výsledky analýzy naměřených dat vodních stavů, hladin podzemní vody a dešťových srážek ve studii Janský a Turek (2012) v povodí horní Lužnice během suchých i povodňových událostí prokazují retenční vliv říční nivy na hydrologický režim toku. Během suchých period byla mezi měrnými stanicemi zjištěna až poloviční ztráta průtoků břehovou infiltrací do oblasti přilehlé nivy, během povodňových událostí byl zaznamenán translační účinek nivy, který klesal s rostoucí extremitou povodně.

Schopnost půdy zadržovat vodu závisí vedle dostupnosti vody především na jejích zrnitostních a strukturních vlastnostech, které předurčují její pórovitost, hydraulickou vodivost, a tím i schopnost půdy provádět vodu jak vertikálním, tak horizontálním směrem (DOSTÁL et al., 2012a). Parametr popisující tyto vlastnosti je nazýván retenční kapacita půdy. Její hodnota je ohraničena dvěma situacemi. Maximální využití retenční kapacity ohraničuje počátek perkolační fáze. Během této fáze půdou voda protéká, aniž by se v ní významně akumulovala a dochází k takovému zaplnění (ať už infiltrací ze zaplavení nivy či dešťových srážek), které převyšuje kapilární síly půdy a způsobuje odtok z půdy do podloží. Opačná hranice minimálního využití retenční kapacity půdy nastává při dosažení bodu vadnutí, a tedy neschopnosti dalšího odběru vody vegetací na transpiraci (TESAŘ et al., 2001; LICHNER et al., 2004).

Z výsledků studie Dostála et al. (2012a) o vlivu retenčního potenciálu nivních půd na transformaci povodňové vlny vyplývá, že jejich vliv je zanedbatelný. Hlavně u přírodě blízkých niv je zapříčiněn převážně mělkou hloubkou hladiny podzemí vody. Nivní půdy jsou navíc obecně považovány za velmi nehomogenní, často tvořeny různými materiály s nepropustnými jemnozrnnými proplásky vylučující rychlou infiltraci do půdního profilu. Jemnozrnný materiál dále umocňuje vztlínání a způsobuje silné zvlhčení půd nad hladinou podzemní vody (DOSTÁL et al., 2012a; DOCHARTAIGH et al., 2019). Tyto faktory, tak mohou zamezovat efektivní infiltraci, která je navíc během povodňových situací ovlivněna také dynamikou povodňové vlny. V případě bleskových povodní s rozlivem do nivy, kde převládají těžké půdy s nízkou hydraulickou vodivostí, se voda nemusí ani stihnout vsáknout, a dochází tak k okamžitému odtoku, případně zachycení půdního vzduchu a znemožnění krátkodobého vstupu vody do póru blízko povrchu. V případě nivních půd s vysokou horizontální hydraulickou vodivostí existuje možnost zaplnění disponibilního retenčního prostoru ještě před samotným vyběžením.

Významnější disponibilní prostor byl v nivách odhadnut u zemědělsky využívaných půd, které vykazují vlivem hospodaření lepší strukturu, jsou propustnější a působením odvodnění si udržují nižší hladinu podzemní vody (DOSTÁL et al., 2012a). Autoři však neberou v potaz dočasnost efektu hospodářských úprav na zlepšení struktury zemědělské půdy v říčních nivách. Intenzivní obhospodařování půd a jejich odvodňování vede postupně ke zpětné degradaci struktury půdy a opětovnému zhoršení vlhkostních podmínek pro zemědělskou činnost (KURÁŽ, SOUKUP, 2004). Přítomnost těžké techniky v oblasti říčních niv vede k utužení půdního profilu, omezující infiltraci ať už dešťových srážek či vody z inundace. Drenážní systémy s sebou nesou deformaci hladiny podzemní vody a snížení podílu organické hmoty, která má pozitivní vliv na tvorbu agregátů, a tedy i na vývoj struktury půdy (ABID, LAL 2009; MONTAGNE et al., 2009; O'CONNEL et al., 2007).

Možnosti zlepšení struktury půdy vedle zemědělského obhospodařování se nabízejí také v alternativních způsobech, jako např. změnou půdního pokryvu. Povrchy kryté celoročně vegetací mají schopnost prokypřovat půdu kořenovým systémem, zvyšovat její pórovitost, a tedy i infiltrační schopnost (NAEF et al., 2002). V prostředí říční nivy však pozitivní vliv změny vegetačního krytu nemusí být jednoznačný. V případě lesních porostů dochází v průběhu teplejšího půlroku ke vlivu evapotranspirace na snížení hladiny podzemní vody, která v případě lužního lesa může vést k hodnotám pod bodem vadnutí až po 60 % dnů v průběhu vegetačního období (KLÖCKING, HABERLANDT, 2002; KRAUSE et al., 2007; STŘEDA, 2008). Tento efekt se může jevit jako pozitivní pro transformaci povodní, pro které se tak zvětší disponibilní prostor v půdě. Negativní vliv je však možné vyvodit v suchých obdobích, kdy výrazná konzumace půdní vláhy může představovat riziko v dosažení nebo i překročení minimálních zůstatkových průtoků v korytě (KLÖCKING, HABERLANDT, 2002; KRAUSE et al., 2007; STŘEDA, 2008; FOHRER et al., 2001). Při managementu v povodí se tak nabízí zvážit významnost těchto procesů v rámci prevence nedostatkových průtoků v korytě či poklesu hladin podzemních vod.

Transformace v prostoru říční nivy

Potenciál říční nivy k transformaci průtoků a tedy i zpomalení odtoku vychází především z jejích morfologických charakteristik, které jsou dány hlavně jejím vývojovým stupněm (DOSTÁL et al., 2012b; JUST, 2005). Lze mezi ně zařadit podélný sklon, efektivní inundační prostor a drsnost nivy. Vliv dostupného prostoru na retenční schopnosti říční nivy je patrný ze studie Weyskrabová et al. (2012), ve které byly simulovány transformace povodňových průtoků v nivách řek horní Lužnice, Blanice a Stropnice. I přesto že se v prvním případě jedná o přírodě blízký tok a dvě zbylé lokality představují typické antropogenně upravené říční nivy včetně regulovaných koryt, zaznamenaly právě oblasti Blanice a Stropnice díky morfologickým predispozicím nejvyšší hodnoty translace a transformace povodňové vlny. Jak však studie Weyskrabové et al. (2012) dále uvádí, v případě změn charakteru říční nivy a koryta v rámci jedné lokality, dosahovaly nejvyšších hodnot transformací situace s přírodě blízkými mělkými koryty. Těchto závěrů dosáhly také studie Schober et al. (2015), Di Baldassare et al. (2010) či Acreman et al. (2003) hodnotící vliv odstranění či umístění hrází podél koryt na odtok. V případě mělkých

koryt dochází k intenzivní komunikaci mezi tokem a říční nivou, která se může na transformaci průtoků a retenci vody podílet i při nižších průtocích (DOSTÁL et al. 2012b; JUST, 2005; PITHART, 2015; VESELÝ, 2012). Naproti tomu u zahloubených či ohrázkovaných koryt dochází k urychlenému odtoku a inundace nastává jen při extrémnějších povodňových událostech. Navíc se zde objevuje riziko poklesu hladiny podzemní vody zapříčiněné zahloubením koryta a následného vysoušení říční nivy (DOSTÁL et al. 2012b; JUST, 2005; PITHART, 2015; ŠKARPICH et al., 2016b; VESELÝ, 2012).

Transformaci průtoků v říční nivě ovlivňují také její drsnostní parametry. Drsnost říční nivy je určena charakterem její morfologie (např. makrodrsnosti v podobě depresí) a vegetačního pokryvu. Jako nejefektivnější porosty pro transformaci průtoků a dočasné zpomalení odtoku se udávají lužní lesy, keřovité vrby či rákosiny, jejichž efekt se nejvíce uplatňuje při malých hloubkách a klesá s rostoucí extremitou průtoků (DOSTÁL et al., 2012a; LANGHAMMER, 2007; THOMAS, NISBET, 2007; WEYSKRABOVÁ et al., 2012). Jak ale bylo zmíněno výše, porosty mohou v oblasti říční nivy představovat riziko v období teplého půlroku, kdy vlivem evapotranspirace může dojít k negativnímu ovlivnění hladiny podzemní vody a následně i průtoků v korytě (STŘEDA, 2008; KRAUSE et al., 2007).

2.2. Příčiny a projevy změn přirozené retence vody v říční nivě

Umělé zásahy do přírodních systémů s sebou přinášejí jak přímé, tak nepřímé dopady na jejich stav. Tyto dopady se v případě říční krajiny mohou týkat poklesu kvality vod, změny vodní bilance v podobě urychlení průtoků, možnosti výskytu extrémních hydrologických událostí, poklesu retenční schopnosti říčních niv a v závěru vyústit ve změnu či ústup druhů i celých společenstev a degradaci celého říčního ekosystému. Následující kapitola přibližuje efekty lidského působení jak v údolních nivách, tak v celých povodích, které v kombinaci s klimatickými faktory mohou v budoucnu ovlivňovat množství vody, které bude možné zachytit a udržet v prostoru říčních niv.

2.2.1. Lidský faktor

Regulace vodních toků

Přirozený charakter říčních systémů disponující inundačním prostorem je typický řadou vlastností, které přispívají k podpoře retence vody v říční nivě. Vlastnosti vodního toku jako nízká kapacita koryta a členitost trasy toku podporují intenzivní komunikaci mezi korytem a říční nivou, ať už laterálně skrze břehovou infiltraci či vertikálně během inundace, kde dochází navíc k interakci s příbřežní vegetací zapojující se do transformace povodní (KRAUSE et al., 2007; PITHART, 2015; LANGHAMMER, 2007). I přes tento fakt je v dnešní krajině jen stěží možné nalézt takové typy vodních toků, které by těmito vlastnostmi disponovaly. Až 80 % významných toků je v Evropě modifikováno (NIENHUIS, LEUVEN, 2001) a známky upravenosti vykazují

28,4 % délky říčních sítí (LANGHAMMER, 2007). V ČR se mezi přírodě blízké či slabě modifikované řadí pouze horní části příhraničních povodí a toky Vysočiny (LANGHAMMER, 2014).

Regulace a zkracování říční sítě jsou na území ČR často spojovány s obdobím 50. let 20. století, kdy docházelo k výraznému zásahu do přirozeného charakteru toků, které ustupovaly zemědělským plochám chráněným před zaplavením podélnými hrázemi (LANGHAMMER, 2007). Transformace říčních sítí je však možné pozorovat již od středověku. Později, zejména pak v 19. století, byly předpoklady pro vybřežování i během nižších průtoků vlivem člověka omezeny (NIENHUS, LEUVE, 2001; JUST, 2005; LANGHAMMER, 2007). Hlavními důvody bylo soustředění průmyslových objektů, zemědělských ploch i rozšiřujících sídel blíže k vodním tokům, ať už kvůli zdroji vody, využití jejího energetického potenciálu či jako dopravní trasy např. při splavování dřeva. Blízká přítomnost vodního toku však představovala během povodňových průtoků riziko, které muselo být minimalizováno. Pro zajištění průtoků vyhovujících vodní dopravě musely být vodní toky také často narovnány a regulovány. Zejména z těchto důvodů tak docházelo ke zpevňování koryt, jejich zkapacitnění sloužící k převedení povodňové vlny, budování jezů a stupňů regulujících erozi dna či stavby podélných protipovodňových hrází (LANGHAMMER, 2007).

Změna morfologie vodních toků, na které se tak významně podepsal rozvoj kulturní krajiny, však s sebou přinesla řadu vedlejších efektů. Omezení průtočného prostoru a napřímení říčních úseků vedlo k vyšší koncentraci průtoků, jejich urychlenému odtoku, a tedy i vyšší energii, která níže po toku představovala riziko během povodňových průtoků (LANGHAMMER, 2007). Demonstrace dopadu technických úprav koryt je možné představit na studii Di Baldassarre et al. (2009), který modeloval vliv historického navyšování hrází podél řeky Po v Itálii. Zde způsobilo zvýšení hrází o 2 m nárůst kulminačních průtoků o 15 %. Modelované výsledky tak upozornily na nebezpečí, které zvyšování podélných hrází s sebou přináší. To v případě studie spočívalo v urychlení proudění v korytě, až 4x většímu objemu odtoku a nebezpečí následného protržení hrází a zaplavení území o 5x větší ploše, než by tomu bylo v opačném případě, kdy ke zvýšení hrází nedošlo. S podobnými závěry je možné se setkat u jiných hypotetických studií např. Schober et al. (2015) a Acreman et al. (2003), tak u studií založených na dlouhodobém monitoringu např. Clilverd et al., (2016) či Czech et al. (2016). Czech et al. (2015) se zaměřila na porovnání upravených a přirozeně se vyvíjejících úseků na toku Biała v Polsku. Z nejdůležitějších poznatků je zapotřebí poukázat, na pokles průtoků v přirozeném úseku toku až o 31 %, tak jako na pokles smykového tření, které bylo prokázáno rozdílností ve velikosti dnových sedimentů a popisuje náchylnost říčního dna k erozi. Studie tak prokazuje již známý vliv regulovaných koryt na urychlení průtoků a zvýšení smykového napětí v korytě vedoucího k erozi dna a umocňující ztrátu potenciálu pro vybřežení a zadržení povodňových průtoků v říční nivě. Dopady hydrotechnických staveb uvnitř koryt a regulacemi vodních toků v oblasti karpatských řek se zabývají také Škarpich et al. (2016a, b), Wyzga (1996), Zawiejska a Wyzga (2010). Výsledky jejich studií o vlivu technických opatření řek se shodují na tom, že při aplikaci technických opatření dojde k urychlení odtoku, a tedy i zvýšení rychlosti proudění v korytě vedoucí k intenzivní erozi a následnému zahlubování řek. Zahlubování řek dále vede k poklesu možnosti vybřežení a iniciuje spolu s hladinou v korytě i pokles hladiny podzemní vody (ŠKARPICH et

al., 2016b). Dalším faktorem podporujícím zahlubování řek je omezení transportu sedimentů, které jsou z velké části zadrženy příčnými stavbami (např. jezy) iniciující fenomén hladových vod. Kombinace těchto opatření vyúsťuje v řadu negativních dopadů omezujících retenční potenciál říční nivy. Jmenovitě je možné uvést urychlení odtoku, zintenzivnění průchodu povodně, absenci zapojení říční nivy do procesu transformace a retence vody i změnu druhového zastoupení v přilehlé říční nivě v důsledku poklesu hladiny podzemní vody.

Protože se zmíněné morfologické úpravy neshodují se zásadami WFD, představují tak problém pro dosažení dobrého ekologického stavu (DES) vodních toků. Řešení těchto problémů se může nabízet v revitalizacích morfologie koryta, které však vzhledem k potřebám současného hospodářského využívání údolních niv a PPO může představovat problém v podobě nedostatku místa pro takovéto zásahy.

Změny land use

Další oblastí lidských zásahů do přirozeného odtokového režimu a následného množství zadržené vody jak v říční nivě, tak v celém povodí je způsob využití půd (land use) a typ jejich pokryvu (land cover). Počátky významných změn ve způsobu využívání půd v ČR jsou soustředěny zejména do období 50. let 20. století. V této době byly naplňovány vize socialistického hospodářství v podobě scelování pozemků v rámci kolektivizace, zúrodňování půd jejich odvodňováním a zemědělské intenzifikace jak v údolních nivách, tak mimo ně. Odkaz těchto změn je z převážné části patrný dodnes. Uvedené změny představují riziko zrychlení povrchového odtoku, a v případě povodní hrozbu rychlejšího nástupu kulminačních průtoků (LANGHAMMER, 2007).

I přesto, že se studiem vlivu land use na odtok z povodí zabývá řada studií, je obtížné nalézt obecný závěr. Výsledky se liší podle měřítka povodí, geografických charakteristik povodí (charakter půd, sklon, hustota říční sítě, klimatické podmínky) a aplikovaných metod. Shoda však panuje ve vlivu prostorového měřítka a intenzity příčinných srážek či povodní na pozorované výsledky. Pokles vlivu land use na odtok z povodí totiž klesá se vzrůstající hodnotou těchto parametrů (CAMORANI et al., 2005; FOHRER et al., 2001; JENÍČEK, 2006; LANGHAMMER, 2007; NAEF et al., 2002; NIEHOFF et al., 2002; THOMAS, NISBET, 2007; RAK et al., 2016). Ať je dopad charakteru využití půd na odtokový režim negativní, či pozitivní, je jeho vliv nejvýraznější v povodích regionální úrovně (desítky až stovky km²), a při krátkodobých srážkových událostech či v oblasti nivy při nízkých N-letostech povodní (FOHRER et al., 2007; HÜMANN et al., 2011; NIEHOFF et al., 2002; O'CONNEL et al., 2007).

Typ využití půd, u kterého byl sledován nejvyšší vliv na snížení povrchového odtoku, byl zaznamenán u lesních porostů. Tento efekt je přisuzován vlivu intercepce a podpoře zasakování vody do půdy díky jejímu prokořenění a lepším strukturním vlastnostem, které vzrůstají se stářím porostu (LANGHAMMER, 2007; HÜMANN et al., 2011; NAEF et al., 2002). V případě zamýšlených opatření proti urychlenému odtoku změnou typu land use na les, je však nutné brát v potaz, že míra efektu změny je závislá na aktuálním odtokovém režimu půd. Proto v případě hlubokých půd, kde již převládá požadovaný podpovrchový odtok, by byl efekt takovéto změny

land use na zpomalení odtoku nevýznamný oproti půdám s málo propustnou svrchní vrstvou profilu (FOHRER et al., 2007; NAEF et al., 2002; KRÁLOVEC et al., 2016; KRAUSE et al., 2007). Na území údolních niv, v případě výskytu lesního porostu v prostoru inundace, funguje jeho přítomnost jako retardační prvek. Během povodňových událostí způsobuje zpomalení průchodu povodně inundací, zpětné vzduť a delší setrvání vod v dané lokalitě, což má za následek zpomalení odtoku (THOMAS, NISBET, 2007; RAK et al., 2016). Přítomnost lesa, ať už v říční nivě či mimo ni představuje na druhou stranu riziko během nízkých průtoků. V období vegetační sezony dochází k intenzivní transpiraci, která se spolu s evaporací, může rovnat sledovanému úbytku odtoku v důsledku lesního typu porostu (FOHRER et al., 2007; KRAUSE et al., 2007; STŘEDA et al., 2008).

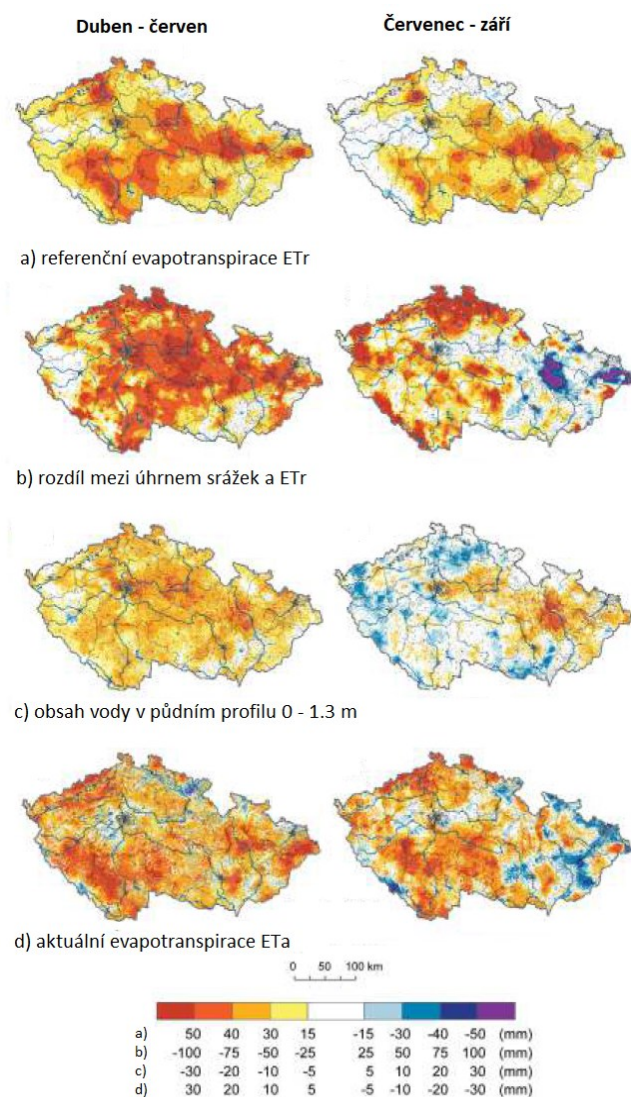
Opačný efekt typu land use na odtok byl popsán u zemědělských ploch, který je charakterizován menší vyrovnaností a celkově vyšší mírou odtoku (ROBINSON et al., 2003; KLOCKING, 2002; LANGHAMMER, 2007). Hlavně v oblastech intenzivního zemědělství je efekt urychlení odtoku podpořen dalšími faktory, mezi které patří odvodnění zemědělských ploch a jejich utužení v důsledku zapojení těžké techniky do jejich obhospodařování. Tyto faktory vedou k degradaci zemědělské půdy a následně ke snížení její infiltrační schopnosti (O'CONNEL, 2007; LANGHAMMER, 2007; KRAUSE et al., 2007; MONTAGNE et al., 2009).

2.2.2. Klimatický faktor

Dopady probíhající klimatické změny se postupně odráží na vodní bilanci říčních systémů. V současné kulturní krajině mohou navíc tyto změny být umocněny nevhodnými lidskými zásahy ať už v podobě technických opatření či zemědělských principů v údolních nivách i celém povodí.

Jako hlavní klimatické parametry ovlivňující vodní bilanci mohou být označeny teplota, srážky a evapotranspirace (BRÁZDIL, TRNKA, 2015). Podle páté hodnotící zprávy Mezivládního panelu pro změnu klimatu (IPCC) došlo za posledních 130 let ke vzrůstu globální teploty o 0,83 °C a je očekáván její další růst (STOCKER et al., 2013). Tento trend může do budoucna spustit řetězce událostí, lišící se od současného stavu jak intenzitou (extrémní hydrologické události), tak prostorovým i časovým rozmístěním. Dalším parametrem podílejícím se na charakteru vodní bilance jsou srážky. Předpovědní modely napovídají, že dochází k poklesu četnosti jejich výskytu, který však může být na druhou stranu vykompenzován zvýšením intenzity jejich projevu. Tyto předpovědi vycházejí z faktu, že teplejší vzduch disponuje vyšší kapacitou pojmout vzdušnou vlhkost, což vede ke zvýšení množství vodní páry v atmosféře. Tento jev tak může vyústit v intenzivní přivalové srážky s rizikem výskytu povodní, urychleného odtoku a zvýšené eroze (TRENBERTH, 2011; ROMANOWICZ et al., 2016; HALL et al., 2011; HUNTINGTON, 2006; HANEL et al., 2011). Rostoucí teplota se dále odráží na množství půdní vláhy. Klimatické modely předpovídají významnou změnu hydrických režimů půd. S růstem teploty vzduchu roste také teplota půd, které spolu s rostoucími hodnotami evapotranspirace a poklesem četnosti srážek vedou ke zvýšení počtu dní s nedostatkem půdní vláhy a k postupnému snižování disponibilní vody v půdě (TRNKA, 2013).

Projekce budoucích změn a adaptačních opatření byly ukotveny do české legislativy v podobě Strategie přizpůsobení se změnům klimatu v podmínkách ČR, která byla v říjnu 2015 schválena vládou ČR. Podstata změn hydrologické bilance pro ČR vychází z projekcí srážek a teplot pro



Obr. 2.1: Statisticky významné trendy klíčových parametrů vodní bilance v ČR v období 1961–2012

Upraveno podle Brázdil, Trnka (2015)

(BRÁZDIL, TRNKA, 2015). Významný vzestup zaznamenává aktuální evapotranspirace (ETA) v měsíci dubnu, kdy jsou zásoby vody rostlinami postupně vyčerpány a jsou čím dál tím více závislé na půdní vlhkosti a srážkách. Z Obr. 2.1 (d) je patrné, že v oblastech chudých na tyto zdroje vláhy jsou hodnoty změny ETA nízké, kdežto v místech s dostatkem zdrojů pro evapotranspiraci její hodnoty rostou.

Predikce změny srážek na území ČR nejsou pro její polohu v přechodné oblasti mezi předpokládaným růstem srážek na severu a jejich poklesem na jihu Evropy jednoznačné (BRÁZDIL, TRNKA, 2015). Jejich sezónní odhad zobrazuje pokles letních a nárůst zimních srážek s pravděpodobností četnějšího výskytu jejich extrémnější podoby (tj. průměrná doba

celou Evropu, což vede k pozorování obdobných trendů postupného zvyšování teploty, které je nevýznamnější převážně pro letní období (BRÁZDIL, TRNKA, 2015). Růst teploty má mj. dopad na posun počátku i vrcholu vegetační sezóny, což má za následek dřívější zvýšení míry evapotranspirace ovlivňující pokles půdní vláhy, který je v první polovině vegetačního období patrný z Obr. 2.1 (c) (BRÁZDIL, TRNKA, 2015; HANEL et al., 2011). Snižování půdní vlhkosti vlivem evapotranspirace je vedle růstu teploty zapříčiněno také rostoucími hodnotami globálního záření v měsících duben, květen a srpen a poklesem relativní vlhkosti vzduchu, které jsou predikovány spíše v oblastech s dominancí orné půdy, než v oblastech s trvalými travními porosty a lesy. Zvyšování evapotranspirace se tak stává prekurzorem poklesu obsahu dostupné půdní vláhy, jejíž hodnoty za posledních 50 let poklesly až o 20 % z hlediska obvyklé zásoby vody v kořenové vrstvě půdy

opakování menší než jeden rok, 95% kvantil denních srážek) (BRÁZDIL, TRNKA, 2015; HANEL et al., 2011). Množství srážek spolu s hodnotami referenční evapotranspirace (ET_r) určují vláhovou bilanci, která představuje ukazatele dostupné vody pro povrchový a podpovrchový odtok, a tedy i potenciální vody zachytitelné v krajině. Jak je patrné z Obr. 2.1 (b), hodnota vláhové bilance (rozdílu mezi srážkami a ET_r) v první polovině vegetačního období (duben–červen) klesá téměř na celém území ČR, což představuje pokles půdní vlhkosti zapříčiněný převahou evapotranspirace nad srážkami. V letním období tak kombinace růstu teploty, poklesu srážek a zvýšené evapotranspirace dopadá na hydrologickou bilanci v podobě sníženého odtoku a postupného poklesu vody v povodí (BRÁZDIL, TRNKA, 2015). Typický zdroj doplňující zásoby podzemní vody představuje sněhová pokrývka odtávající v průběhu jarních měsíců a zajišťující tak i dostatečný průtok v korytech vodních toků. S rostoucími teplotami však dochází k ústupu doby konce výskytu sněhové pokrývky, a tedy i dřívějšímu odtání, které je v zimních měsících doplněno růstem srážek v podobě deště s řádově stejným vzestupem výparu. Kombinace těchto faktorů se tak stává dalším předpokladem podporujícím urychlení odtoku a ochuzení obsahu vláhy zadržené v půdním profilu (BRÁZDIL, TRNKA, 2015; HANEL et al., 2011).

2.3. Přístupy a opatření pro zvýšení retenční schopnosti říční nivy

Opatření podporující retenci vody v říční nivě disponují potenciálem řešit či mírnit komplexní problémy od urychleného odtoku, negativních dopadů povodní a sucha až po změny odtokového režimu v důsledku klimatických změn. Jejich uplatnění nabízí možnosti docílit přirozeného vodního režimu a zvýšit přirozené retenční schopnosti říčních niv. Z těchto důvodů tak tato opatření nacházejí umístění v řadě legislativních dokumentů jak na národní tak evropské úrovni.

Jedním z nejčastěji skloňovaných opatření je **řízené povodňování nivy**, které má za cíl snížení kulminačních průtoků a celkového odtoku, regulaci rychlostí proudění, zvýšení akumulace vod a jejich postupného zasakování (EC, 2013; MŽP, 2015). Uplatnění tohoto opatření reaguje na historické úpravy vodních toků, které omezují propojení říčních koryt s přilehlými údolními nivami a urychlují odtok vody z říční sítě (MŽP a MZE, 2015). Přístupem vedoucím k dosažení zmíněných cílů je buď respektování přirozených záplavových území a regulování činnosti v těchto oblastech, nebo uvolnění prostoru pro rozlivy v místech s regulovanými vodními toky, kde by zároveň nedošlo k ohrožení okolních pozemků (MŽP a MZE, 2015; MŽP, 2015).

Opatřením, které umožňuje takový zákrok, jsou **revitalizace vodních toků** (EC, 2013; MŽP, 2015). Jako revitalizaci je možné označit přístup usilující o obnovu hydrologického režimu v povodí z hlediska kvality i kvantity vody, iniciování korytotvorných procesů a nárůst geodiverzity podmiňující rozšíření počtu organismů i rostlin vázaných na říční prostředí (JUST, 2005; MATOUŠKOVÁ, 2007, PITHART, 2015). Jedním z kroků revitalizačního procesu je změna morfologie regulovaného koryta, ze kterého jsou prvně odstraněna nepotřebná technická opevnění a případné protipovodňové hráze jsou odsazeny. Při modelování nového koryta je volen mělký profil s hodnotami korytotvorného průtoku do Q_1 , optimálně Q_{30d} , umožňující častější

výskyt rozlivů z koryta do okolní nivy. Kromě technických zásahů do koryta toku se revitalizace soustředí také na zlepšení ekologického i hydromorfologického stavu říční nivy. Zde se jedná o podporu vývoje přírodě blízkého stavu vegetace, který navíc v případě zaplavení říční nivy působí jako regulační prvek rychlostí proudění (JUST, 2005; MATOUŠKOVÁ, 2007; MŽP, 2018; THOMAS, NISBET, 2007; DIXON et al., 2016).

Podpora rozlivů do nivy se nabízí také ve formě odvedení části průtoku z hlavního toku ještě před vyběžením, k čemuž mohou sloužit nově vytvořená **boční koryta** nebo napojená stará říční ramena (JUST, 2005; MATOUŠKOVÁ, 2007). Usměrnění postranního koryta do požadovaných inundačních oblastí představuje nástroj jak protipovodňové ochrany, tak podpory zvýšení retence vody v říční nivě (JUST, 2005; MATOUŠKOVÁ, 2007; HANEL et al., 2011; MZE, 2000; KRAKOVSKÁ et al., 2017). Vedle pozitivních efektů je však nutné podotknout také možnost negativního vlivu na minimální průtoky v původním korytě, jejichž hodnota může během suchých období vlivem postranního koryta poklesnout. Je samozřejmě možné technicky navrhnout postranní koryto tak, aby sloužila pouze k převádění povodňových průtoků, z ekologického pohledu je však vhodné zachování alespoň minimálního průtoku v postranním korytě po celý rok (MATOUŠKOVÁ, 2007).

Podpora retence vody formou revitalizací vodních toků však nemusí být vždy efektivní (MŽP, 2018, JUST, 2005). V případě, že je hlavním účelem inundačního prostoru efektivně přispět ke snížení kulminačních průtoků, případně zvýšit akumulace vod a jejich postupné zasakování, představuje stavba **malé vodní nádrže** vhodný způsob k regulaci nátoků do inundačního prostoru v čase kulminačních průtoků, a jejich postupné vypouštění (MZE, 2005). Pro tento účel představují vhodný prvek postranní ramena, která je možné využít k efektivnějšímu usměrnění průtoků do retenčního prostoru (JUST, 2005). U návrhů malých vodních nádrží je z ekologického pohledu vhodné držet se několika doporučení. Prvním je umístění nádrží mimo vodní tok, čímž by měly být minimalizovány možné negativní vlivy na splaveninový režim, morfologii toku a omezení migračních překážek v korytě (MŽP, 2018). Druhým je udržení prostoru nádrže celoročně pod částečným trvalým nadržením vody, pro což jsou vhodná právě postranní protékající koryta. Tento přístup má pozitivní efekt jak na stabilitu hrází, tak na podporu retence vody i ekologických funkcí retenčního prostoru (JUST, 2005; MATOUŠKOVÁ, 2007; MŽP, 2018).

Problémem při zaplavování niv se však mohou stát nevhodné způsoby využívání záplavového prostoru, který je často osídlen a kvůli úrodnosti půd slouží zemědělským účelům. Pokud by prostor říční nivy naplňoval jak zemědělskou, tak inundační funkci, hrozil by při povodňových průtocích odnos jemných částic ornice v místech rychlejšího proudu, vyplavování nutrientů, pesticidů a dalších látek vedoucí ke zhoršení kvality vody, která by mohla představovat ohrožení kvality podzemních vod zejména v jímacích územích. Intenzivní obhospodařování půd má navíc často za následek jejich utužení, které limituje jímací schopnost půdy pro vodu a urychluje její odtok. V případě umístění obytných, průmyslových či jiných staveb a objektů do oblasti říční nivy, představuje jejich lokalizace riziko střetu s povodňovými průtoky, které může kromě ekonomických ztrát vést také ke ztrátám na životech (JUST, 2005; LANGHAMMER et al., 2008; MŽP, 2018; MZE, 2000; O'CONNEL et al., 2007). Proto je z těchto důvodů aktivita v záplavových územích regulována definováním aktivních zón omezující jakoukoliv činnost,

která by mohla případné škody způsobit (MŽP, 2018; MZE, 2000). Namísto intenzivního zemědělství v prostoru říčních niv je tak pozornost směřována k jejich ochraně, extenzivnímu využívání a podpoře přirozeného vývoje vedoucího ke vzniku lužních porostů či mokřadních biotopů (MATOUŠKOVÁ 2007; JUST, 2005).

2.4. Hydraulické modelování

2.4.1. Základy hydraulického modelování

Hydraulické modelování je jedním z přístupů sloužící jako nástroj k porozumění procesů podílejících se na proudění v korytech a říčních nivách. Tyto přístupy jsou často využívány pro hodnocení např. povodňových rizik či v obecnější rovině jako prostředek pro management v říční krajině. V rámci hydraulického modelování probíhá modelování proměnných jako je objem, vodní stav, rozsah záplav či rychlost proudění. Jako nástroj hydraulického modelování slouží matematické modely, které se pokoušejí napodobit pohyb tekutin při zohlednění fyzikálních zákonů (TENG et al., 2017).

Postup práce při použití hydraulického modelu se běžně sestává z několika kroků. Prvním krokem je formulace očekávaných výsledků, které by měl model poskytnout. Na základě toho je zvolen modelovací přístup (ustálené/neustálené proudění) a proveden výběr vhodného modelu podle prostorové reprezentace proudění (1D, 1/2D, 2D, 3D). Následuje sestavení geometrie modelu, zadání drsnostních parametrů povrchu a definování okrajových podmínek na přítoku a odtoku z modelovaného území. V případě, že je požadováno, aby výsledky simulace odpovídaly reálné situaci, je nutná kalibrace modelu, která je většinou prováděna na základě manipulace se ztrátovými koeficienty (např. drsností koeficient) a jejíž výsledky jsou porovnávány s pozorovanými hodnotami simulované situace (vodní stav, čára zaplavení, průtok, hydrogram průtoků). Pokud však nejsou dostupná kalibrační data a cílem simulace není stanovení konkrétních hodnot simulovaných proměnných, ale relativní srovnání výsledků simulací, nemusí být absence kalibračních dat na závadu (VALENTA, et al., 2015). Kalibraci může předcházet také citlivostní analýza, která slouží k vyhodnocení nejistot modelu. Zdroje nejistot představují samotné vstupní hodnoty (např. geometrie, okrajové podmínky) či parametry modelu (např. drsnostní parametr). Změnami jejich hodnot dochází i ke změnám výsledků simulací, a proto je cílem citlivostní analýzy zjistit, které ze zdrojů nejistot a v jaké míře mají na výsledky největší vliv. Tyto parametry či proměnné jsou poté použity pro kalibraci modelu (TENG et al., 2017; VALENTA et al., 2015; DI BALDASSARRE et al, 2010; CLILVERD et al., 2016). Ověření věrohodnosti kalibrovaného modelu je prováděno ve fázi verifikace, kdy je již kalibrovaný model testován na vstupních průtocích odlišných od těch, na kterých byl model kalibrován. Posledními kroky je samotná simulace a vyhodnocení výsledků (VALENTA et al., 2015).

Jak je zmíněno výše, přístup k řešení modelovací úlohy je odvozen z účelu modelu. Pokud je požadovaným výstupem modelu maximální hodnota rozlivu, hloubky či rychlosti proudění,

je vhodným přístupem pro řešení úlohy volba ustáleného proudění, kde do modelu vstupuje hodnota kulminačního průtoku. V případě simulování různých situací zaplavení může být zvolena i série o různých hodnotách průtoků, které jsou simulovány odděleně. Pokud je požadován časový průběh průtoků, např. při simulování průchodu povodňové vlny, je vhodným řešením přístup neustáleného proudění (VALENTA et al., 2015).

V závislosti na prostorové reprezentaci průtoku v inundaci jsou rozlišovány modely na 1D, 1/2D, 2D a 3D (TENG et al., 2017). Vzhledem k zaměření práce jsou blíže popsány první dva základní přístupy reprezentace průtoků, a to 1D a 2D.

Použití 1D modelů k simulaci proudění v korytě nebo v říční nivě se nabízí, pokud není vyžadováno detailnější řešení proudění a pokud záměr modelování nevyžaduje informace o proudění v jiných směrech než ve směru rovnoběžném s prouděním podél toku (TENG et al., 2017; BRUNNER, 2016a; VALENTA et al., 2015). Volba okrajových podmínek je závislá od volby modelovacího přístupu, tedy ustáleného či neustáleného proudění. V případě ustáleného proudění se nabízí pro vstupní i výstupní profil volit např. konsumpční křivku, sklon čáry energie, kritickou hloubku, hodnoty kulminačního průtoku či úroveň hladiny. Při modelování neustáleného proudění se na výstupním profilu zpravidla volí konsumpční křivka a jako vstupní hodnoty slouží časový průběh průtoků. Umístění dolní okrajové podmínky je zároveň doporučováno lokalizovat v dostatečné vzdálenosti od modelovaného území, aby nebyly výsledky případně vlivem okrajové podmínky ovlivněny. Vzdálenost, do které by měla být okrajová podmínka umístěna, je možné zjistit pomocí citlivostní analýzy (GOODEL, 2010). Při volbě ustáleného proudění v 1D modelu je výpočet od jednoho profilu ke druhému řešen na základě Bernoulliho rovnice o zachování energie (BRUNNER, 2016b). K řešení neustáleného proudění jsou využívány zákony o zachování hmotnosti a hybnosti za použití tzv. Saint-Venantových rovnic (TENG et al., 2017; VALENTA et al., 2015). K řešení zákona o zachování hmotnosti slouží rovnice kontinuity, která popisuje zachování hmotnosti v daném kontrolním objemu. Udává, že rozdíl hmotnostního toku na vstupu a výstupu z kontrolního objemu se rovná hmotnosti akumulované v kontrolním objemu. Řešení zákona o zachování hybnosti je uskutečněno pomocí pohybové rovnice založené na druhém Newtonově pohybovém zákoně. Formulace rovnice se v tomto případě může různit podle toho, jaké síly jsou uvažovány (BETSHOLTZ a NORDLÖF, 2017).

Obě rovnice mohou být zapsány následujícím způsobem:

$$\text{Rovnice kontinuity: } \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

$$\text{Pohybová rovnice: } \frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{g} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x} = -S_e \quad (2.2)$$

kde Q je průtok, U je průměrná rychlost v průtočném profilu o ploše A , t je čas, h je hloubka vody, g je gravitační zrychlení a S_e je sklon čáry energie. Řešení těchto rovnic je založeno na odhadu dvou neznámých, pro každý příčný profil v každém časovém kroku, a to rychlosti a hloubky, které jsou funkcí polohy x a času t , (VALENTA, et al. 2015).

Reprezentace proudění v prostoru říční nivy pomocí 2D modelů se uplatňuje v tom případě, kdy již není možné předpokládat, že proudění je rovnoběžné s prouděním v korytě, jako je tomu

u 1D modelu. Proudění je reprezentováno ve dvou prostorových rozměrech s předpokladem, že třetí rozměr, místní vertikální zrychlení, je zanedbatelné. Toto zjednodušení odpovídá stavu, kdy rozměry rozsahu zaplavení převažují nad hloubkou vody, což je případ povodňových situací (TENG et al., 2017; VALENTA, et al., 2015). Tento stav je řešen pomocí tzv. *rovníc mělké vody* (*Shallow water equations*) vycházející ze zprůměrování hloubky Navier-Stokesových rovnic. Rovnice se řídí stejnými principy jako při simulaci 1D proudění, jen jsou počítány ve dvou prostorových rozměrech (BETSHOLTZ a NORDLÖF, 2017). Jejich zápis je možné uvést ve formě:

$$\text{Rovnice kontinuity: } \frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial(hu)}{\partial x} + v \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (2.3)$$

$$\text{Pohybová rovnice: } \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f_v \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f_u \quad (2.5)$$

kde H je nadmořská výška hladiny, v_t je turbulentní viskozita, c_f je drsnostní koeficient, f je Coriolisův parametr, v a u jsou průměrné rychlosti proudění ve směru x a y . První podmínka v rovnici kontinuity $\frac{\partial H}{\partial t}$ je místní zrychlení, druhá podmínka $u \frac{\partial(hu)}{\partial x} + v \frac{\partial(hv)}{\partial y}$ je konvektivní tření a Coriolisova síla (BRUNNER, 2016b). Za účelem snížení výpočetního času a nestability modelu jsou rovnice mělké vody často zjednodušeny zanedbáním některých podmínek pohybové rovnice. Jedním z takových zjednodušení je aproximace pomocí *difuzní vlny*, kdy jsou zanedbány podmínky zrychlení, turbulentní viskozity a Coriolisovy síly a jako dominantní podmínky působící na kontrolní objem jsou považovány gravitační zrychlení a třecí síla (BRUNNER, 2016b; BETSHOLTZ a NORDLÖF, 2017). Aby byl výpočet proměnných časově efektivní, je stejně jako u 1D simulací využita prostorová diskretizace řídicích rovnic. U 2D modelů již vzhledem k odlišným požadavkům neprobíhá diskretizace v příčných profilech nýbrž ve výpočetní síti, která je vytvořena na podkladu digitálního modelu terénu (TENG et al., 2017; VALENTA, et al., 2015). Struktura výpočetní sítě se odvíjí od použité výpočetní metody. Nejjednodušší z metod je *metoda sítě* (*metoda konečných diferencí*), která umožňuje výpočet neznámých veličin v průsečících pravidelné obdélníkové sítě. Nabízí tak rychlé numerické řešení, které je však omezeno ve zohlednění nepravidelných tvarů terénu, které pravidelná síť nemusí postihnout. Tento problém řeší *metoda konečných objemů*, která je nejrozšířenější používanou metodou. Podporuje vytvoření křivočaré sítě s možností lokálního zhuštění v libovolném místě zvoleném uživatelem. Třetí využívanou metodou je *metoda konečných prvků*, která představuje nejpřesnější vystižení geometrie terénu i s jeho nepravidelnostmi. Nemá předepsanou strukturu, většinou je tvořena trojúhelníkovými a čtyřúhelníkovými prvky a může být libovolně lokálně zahuštěna (TENG et al., 2017; VALENTA et al., 2015).

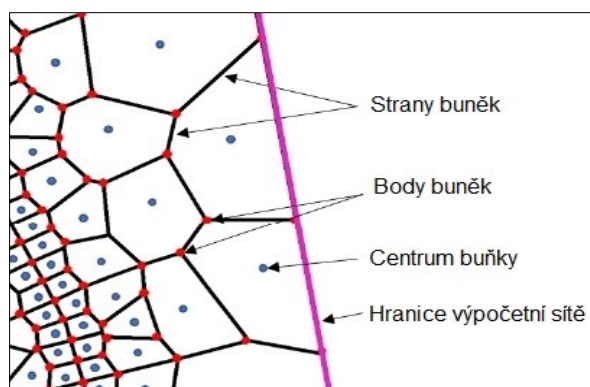
Vzhledem k tomu, že modelovací přístupy představují pouze přibližnou reprezentaci skutečnosti, je nutné počítat s jistou mírou nejistoty, kterou je doporučeno zhodnotit (TENG et al., 2017). Při simulacích reálných průtoků je nutné si uvědomit, že nejistoty pramení již ze samotného matematického popisu proudění, které je zjednodušeno diskretizací matematických rovnic.

Nejistoty mohou vzniknout u samotných hydrologických dat již během jejich měření, ať už chybou v měřicích zařízeních, výpadky měření, omezenou délkou pozorování či systematickými chybami. Případně neobsahují změny, které proběhly vlivem stavebních úprav, využíváním pozemků či klimatickou změnou (TENG et al., 2017). V případě, že vstupní údaje jsou výsledky hydrologických modelů, nesou i tyto výstupy jistou míru nejistoty (ACREMAN et al., 2003). Vyhodnocení nejistot je možné provést v průběhu kalibrace modelu za využití objektivních kritérií např. kritéria Nash–Sutcliffe, porovnávající modelované průtoky s pozorovanými (TENG et al., 2017; CLILVERD et al., 2016; DIXON et al., 2016; HAMMERSMARK et al., 2008). Případně je možné využít i jiných kritérií jako je směrodatná chyba odhadu nebo koeficient variace (DAÑHELKA et al., 2003). Dalším zdrojem nejistot je přesnost reprezentace geometrie. Ta v případě 2D modelů tkví v detailnosti výpočetní sítě, tedy se zvyšující se velikostí buněk ve výpočetní síti dochází ke snížení přesnosti v reprezentaci geometrie. Samotné použité výpočetní metody často disponují nastavením tolerance chybovosti, jejichž manipulací je ovlivňována i přesnost výsledků (TENG et al., 2017; BETSHOLTZ a NORDLÖF, 2017).

2.4.2. 2D simulace v programu HEC-RAS

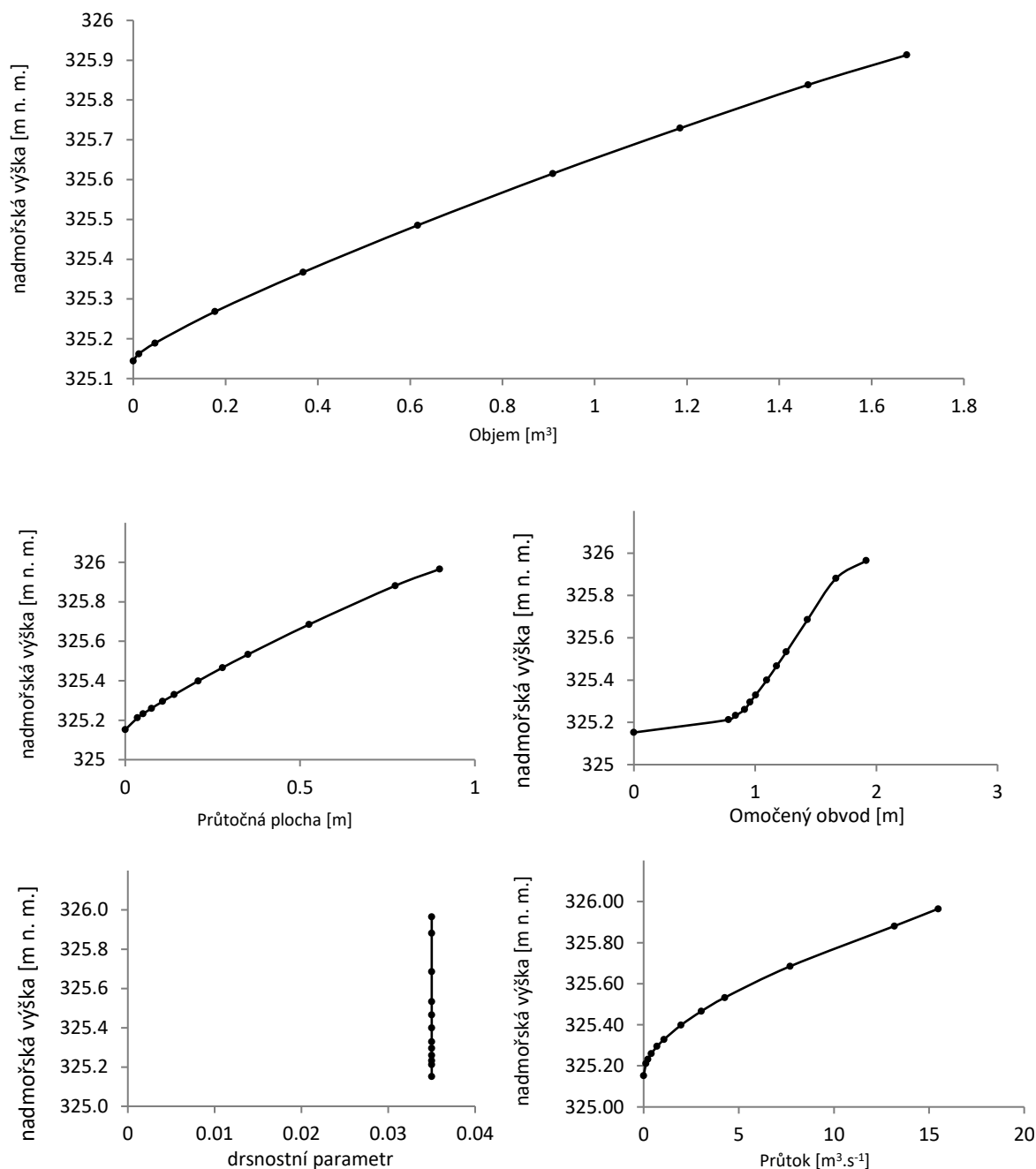
Software HEC-RAS je hydraulický model vytvořený americkým armádním inženýrským sborem přístupný ve formě open source, který umožňuje uživatelům provádět simulace jedno-rozměrného ustáleného proudění, jedno a dvou-rozměrného neustáleného proudění, kvazi-ustáleného proudění, simulaci plně neustáleného transportu sedimentů, analýzy teploty vody i obecné simulace kvality vody (BRUNNER, 2016a). Pro tuto práci byla vybrána varianta 2D neustáleného proudění modelu, která bude dále blíže popsána.

Geometrie pro 2D model je vytvořena pomocí výpočetní sítě vykreslené na DMT (Obr. 2.2). Každá síť je tvořena propojenými buňkami o maximálním počtu 8 stran, jejichž tvar i velikost se mohou lišit. Strany buněk jsou analogií 1D profilů, mezi kterými probíhá výpočet. Body buněk (červeně) slouží k propojení buněk s 1D stavbami (např. propustky) nebo 2D okrajovými podmínkami. Centrum buněk (modře) je místem pro výpočet nadmořské výšky hladiny (BRUNNER, 2016c; BETSHOLTZ a NORDLÖF, 2017).



Obr. 2.2 Popis výpočetní sítě programu HEC-RAS

Upraveno podle Betsholtz a Nordlöf, 2017



Obr. 2.3: Ilustrace výstupů z tabulky hydraulických vlastností vybrané buňky z 2D výpočetní sítě modelu HEC-RAS. První graf (objem vs. nadmořská výška) je vytažen k celé buňce. Zbývající grafy pouze k jedné straně buňky

V porovnání s jinými 2D modely, není v programu HEC-RAS rozlišení terénu pro každou stranu buňky omezeno pouze na jednu hodnotu nadmořské výšky. Naopak jednotlivé strany buněk disponují detailním rozlišením povrchu terénu v místě, které protínají, včetně vypočtených vztahů mezi nadmořskou výškou a vybranými parametry (průtočná plocha, omočený obvod, drsnostní parametr, průtok). Pro prostor uvnitř buňky je vypočten vztah mezi nadmořskou výškou a objemem (Obr. 2.3) (BRUNNER, 2016c).

Tato metoda detailního rozlišení pro jednotlivé strany buňky je prezentována jako „high resolution sub-grid model“ vyvinutá Casullim (2008), jejíž hlavní cíl je zachování dostatečné

přesnosti terénu při zvýšené velikosti buněk výpočetní sítě, a tedy časově efektivnější výpočet. Nevýhodou této metody je fakt, že reprezentace terénu je omezena pouze na strany buněk. Vlastnosti uvnitř buněk jsou představovány pouze vztahem mezi nadmořskou výškou a objemem. Proto je nutné, aby se nejvyšší místa terénních překážek (hráze, násypy) shodovala se stranami buněk. V opačném případě by nebyla popsána jejich blokující schopnost vůči proudění a docházelo by k nereálnému protékání skrz překážku (BRUNNER, 2016c; BETSHOLTZ a NORDLÖF, 2017).

Program nabízí dvě podoby řídicích rovnic mělké vody, a to tzv. full momentum, kdy je zachován plný tvar rovnic, který je doporučen pro popis náhlých změn v proudění (např. prolomení hrází), a zjednodušenou verzi rovnic, tzv. verzi difúzní vlny, kdy jsou zanedbány podmínky zrychlení a turbulentní viskozity. Jako výpočetní metoda je pro 2D model aplikovaná implicitní metoda konečných objemů. Implicitní metoda představuje časovou diskretizaci řídicích rovnic, kdy jsou hodnoty pro další časový krok získány iterací. Oproti explicitní metodě, kde jsou hodnoty proměnných v časovém kroku $n+1$ počítány z hodnot poskytnutých z výpočtu v čase n , umožňuje implicitní metoda zvolení delšího časového korku výpočtu, a tedy kratší dobu samotné simulace (BRUNNER, 2016c; BETSHOLTZ a NORDLÖF, 2017).

2.5. Aplikace revitalizačních opatření a hydraulických modelů ve výzkumu podpory zvýšení retence vody v říční nivě

Hydraulické modely představují hojně používaný nástroj v soukromém i veřejném sektoru jak pro účely výzkumu, tak i aplikace, např. při tvorbě studií proveditelnosti, odhadu rozsahu záplavových území, návrhů konstrukce hydrotechnických staveb a modelování jejich vlivu na proudění či studiích vlivu revitalizačních opatření na transformace povodňových vln a změn zatopených objemů v inundaci.

Vzhledem k početnému výskytu extrémních hydrologických událostí v posledních dekadách a jejich katastrofických účincích, které byly dávány do souvislosti mimo jiné s lidskými zásahy v říční krajině, představují hydraulické modely vhodný nástroj pro simulování dopadů těchto změn na odtokový režim i hledání možností jejich omezení, např. v podobě revitalizačních opatření. Témata takovýchto studií se dotýkají simulací výstavby či odstranění podélných hrází, regulací řek či jejich zpřirodnění, změn land use a jejich dopadů na průchod povodňové vlny, změny zadržených objemů v říční nivě či změny hladin podzemních vod.

Sdružujícím prvkem studií využívající hydraulické modely je použitá metodika, která se mezi studiemi v základech shoduje. Jde o výběr vhodného modelu a vstupních dat, kalibraci a verifikaci modelu a následnou simulaci. Výběr modelu probíhá převážně na základě charakteru dostupných dat a potřeby prostorové reprezentace proudění. Použité hydraulické modely ve vybraných studiích obsahují jak jednorozměrné (1D), dvourozměrné (2D), tak i spřažené modely (1D/2D). 1D modely se omezují na zjednodušení reálné geometrie koryta a přilehlé nivy souborem příčných profilů mezi kterými probíhá výpočet na základě Saint-Venantových rovnic, viz např. Czech et al., (2016); Acreman et al., (2003). V případě simulace komplikovanějšího proudění

naráží však 1D model na své hranice. V těchto případech nachází uplatnění 2D modely, kde je geometrie popsána rastrem digitálního modelu terénu (DMT). Výpočet však oproti 1D modelu může být časově výrazně náročnější, viz např. Valentová et al., (2010). Spřažený model je spojením 1D a 2D modelu, kdy první popisuje pouze proudění v korytě a druhý proudění v nivě, viz např. Di Baldassare et al., (2010); Rak et al., (2016). Vedle dat popisujících geometrii zkoumaného území, tedy příčných profilů či DMT, jsou použita data pro stanovení okrajových podmínek modelu. Pro tyto účely jsou použity hydrologické údaje, jako jsou hydrogramy či konsumpční křivky. Charakter využití půdy a drsnostních podmínek povrchu je popsán drsnostním koeficientem, nejčastěji Manningovým koeficientem drsnosti „ n “, vyjadřující ztráty energie vlivem tření. Tyto hodnoty mohou být určeny buď expertním odhadem, či pro oblast koryta vyhodnoceny laboratorními měřeními ze vzorků sedimentů dna (CZECH et al., 2016; MCALPIN et al., 2016). U témat přesahující pouze analýzu efektu prostoru říční nivy, jako je tomu např. u modelování podpovrchových hydrologických procesů (základní odtok, změna hladiny podzemní vody) (CLILVERD et al., 2016; HAMMERSMARK et al., 2006), vstupují do modelu také další údaje, jako je např. hladina podzemní vody, leaf area index (LAI) a dosah hloubky kořenů. Před samotnou simulací, probíhá kalibrace modelu, která je ve většině případů vybraných studií prováděna buď manuální úpravou drsnostních parametrů (např. ACREMAN et al., 2003; HAMMERSMARK et al., 2008) či automatickou kalibrací nabízenou modelem (CLILVERD et al., 2016), případně jí může předcházet také citlivostní analýza k identifikaci parametrů pro kalibraci modelu (DI BALDASSARRE et al., 2010; CLILVERD et al., 2016). Verifikace zkalibrovaného modelu je podle charakteru simulovaných výstupů provedena porovnáním s pozorovanými údaji, jinými než které byly použity pro kalibraci modelu.

Využití hydraulických modelů k popsání vlivu revitalizačních opatření na retenci vody v říční nivě popisuje řada studií. Dohledané práce se kromě zkoumání vlivu revitalizačních opatření na odtok zaměřují také na opačné situace, tedy regulace koryt, které svými výsledky význam revitalizací opodstatňují.

Na negativní dopady regulací v podobě zvyšování hrází a omezování inundačního prostoru, upozorňují např. Acreman et al. (2003); Di Baldassare et al. (2010); Schober et al. (2015). Studie přinesly závěry o urychlení odtoku vlivem zmenšení inundačního prostoru a zvýšení kapacity koryt. Ten se projevuje v podobě nárůstu kulminačních průtoků, které představují riziko v protržení hrází, rozsáhlejších záplav a vyšších škod, než tomu bylo před regulovaným stavem. Poznatky o poklesu transformační a retenční schopnosti nivy po regulaci koryta a změně přirozeného pokryvu přináší také Valentová et al. (2010). V její studii se však nejedná pouze o simulaci umístění či odstranění hrází, ale jde o detailnější popis hypotetické změny geometrie přírodě blízkého mělkého koryta na koryto napřímené a zkapacitněné za využití úprav DMT. Tyto zásahy s sebou přinesly očekávané výsledky zvýšených kulminačních průtoků a poklesu zadržených objemů v říční nivě. Využití hydraulických modelů nemusí být však použito pouze k hypotetickým scénářům. Czechová et al. (2016) testovala retenční potenciál říčních niv na přirozeně se vyvíjejících a regulovaných úsecích toku Biala v polských Karpatech.

I přesto, že na základě výše zmíněných studií by přirozené toky měly disponovat vyšším potenciálem k retenci vody v říční nivě, studie poukázala na přesný opak. U neupravených úseků sice docházelo k přirozenému vývoji pomocí břehové eroze, ta však doposud nebyla kompenzována agradací sedimentů uvnitř koryta, které zůstává dále zahlobbeno. Proto je koryto schopno převést vyšší podíl průtoků, než je tomu u regulovaných koryt, a podíl převedených průtoků v nivě je tak nižší.

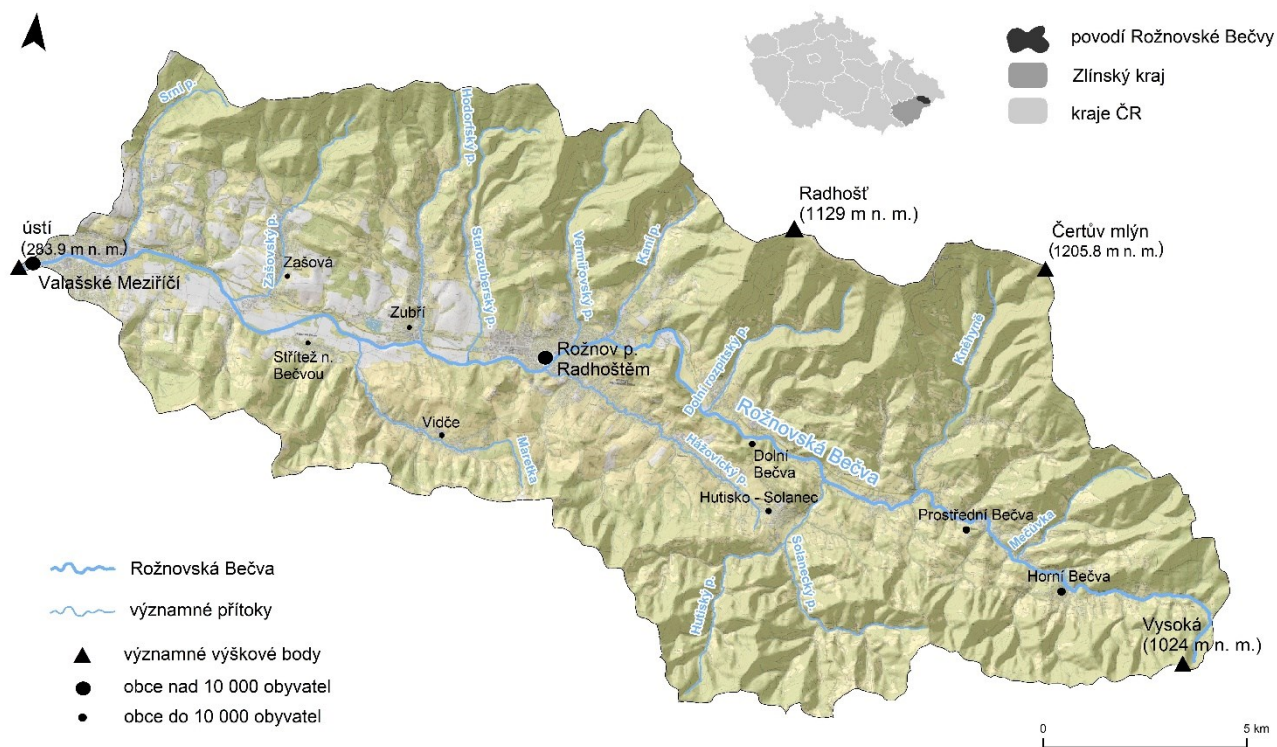
Vedle změn geometrie koryta a jejich vlivu na odtokové poměry, jsou dále zkoumány vlivy změn land use. Ty jsou v rámci revitalizačních úprav a podpory retence vody často spatřovány v zalesnění říční nivy, a tedy zvýšení drsnostního parametru povrchu. Výsledky podporující tuto domněnku přináší opět Valentová et al. (2010), kde studie poukazuje na jasnou pozitivní závislost mezi rostoucí drsností říční nivy a transformací průtoků i zadržených objemů. K méně jednoznačnému závěru však dospěl Rak et al. (2016). Ze studie sice vyplývá, že změna land use ovlivňuje retenci povodňových průtoků, její míra však nezávisí jen na velikosti drsnostního parametru, ale odvíjí se od poměru mezi rozsahem rozlivu a rychlostí proudění v zaplavené oblasti. Zvýšení drsnostního koeficientu totiž vytvořilo z říční nivy jistou „bariéru“ v proudění, což vedlo ke snížení rozsahu záplavy. Zároveň však došlo k poklesu rychlosti proudění, a tedy i pomalejšímu odtoku vody zpět do recipientu. V závěru tak tento efekt vedl k vyšší míře retence než v případě nižších drsností povrchu. Přítomnost „bariéry“ po zalesnění říční nivy uvádí také Thomas a Nisbet (2007). Zalesnění přineslo řadu pozitivních dopadů, jako zpomalení rychlostí proudění v říční nivě, zvýšení hladin i množství zadržených objemů. Možný negativní dopad by však mohl být spatřován v urychlení proudění v korytě, právě vlivem zvýšení drsnosti nivy, která po zatopení odklonila proudění do oblasti s menším odporem, tedy koryta.

Většina studií popisujících transformační a retenční potenciál říčních niv se zaměřuje především na „povrchovou“ část prostoru říční nivy. Je však dobré mít na paměti, že tento přístup nepokrývá celý systém řeka–niva. Proto se některé studie zaměřují také na modelování bilance a změn stavu hladin podzemních vod před a po aplikaci revitalizačních opatření. Mezi takové lze zařadit např. studie Clilverda et al. (2016) a Hammersmarka et al. (2008). Obě studie za využití hydraulického modelu MIKE SHE/ MIKE 11 přináší kromě závěrů o transformačním účinku revitalizačních úprav koryta a nivy, také závěry o pozitivním efektu na častější a delší výskyt inundace. Ty podporují nárůst hladiny podzemní vody a zpomalení jejího poklesu v teplém půlroce, zvýšení saturace svrchních vrstev půdy i objemu vody zadrženého v půdě a celkovém poklesu povrchového i podzemního odtoku.

Přestože výsledky simulací modelů mohou na první pohled vypadat příznivě, nemusí uspokojivě popisovat komplexnost fluvialního systému. Příkladem může být studie Geerlinga a Katera, 2008, která popisuje vliv průtoků a transportu dnových sedimentů na vybrané hydraulické parametry po devíti letech od revitalizace úseku řeky Rýn. Výsledky přinášejí závěr o opětovném návratu hodnot hydraulických parametrů (hloubka, rozsah záplav, rychlost proudění) ke stavu před revitalizací v důsledku aktivní sedimentace ve zkoumaném úseku toku.

3. Fyzicko-geografické poměry zájmového povodí

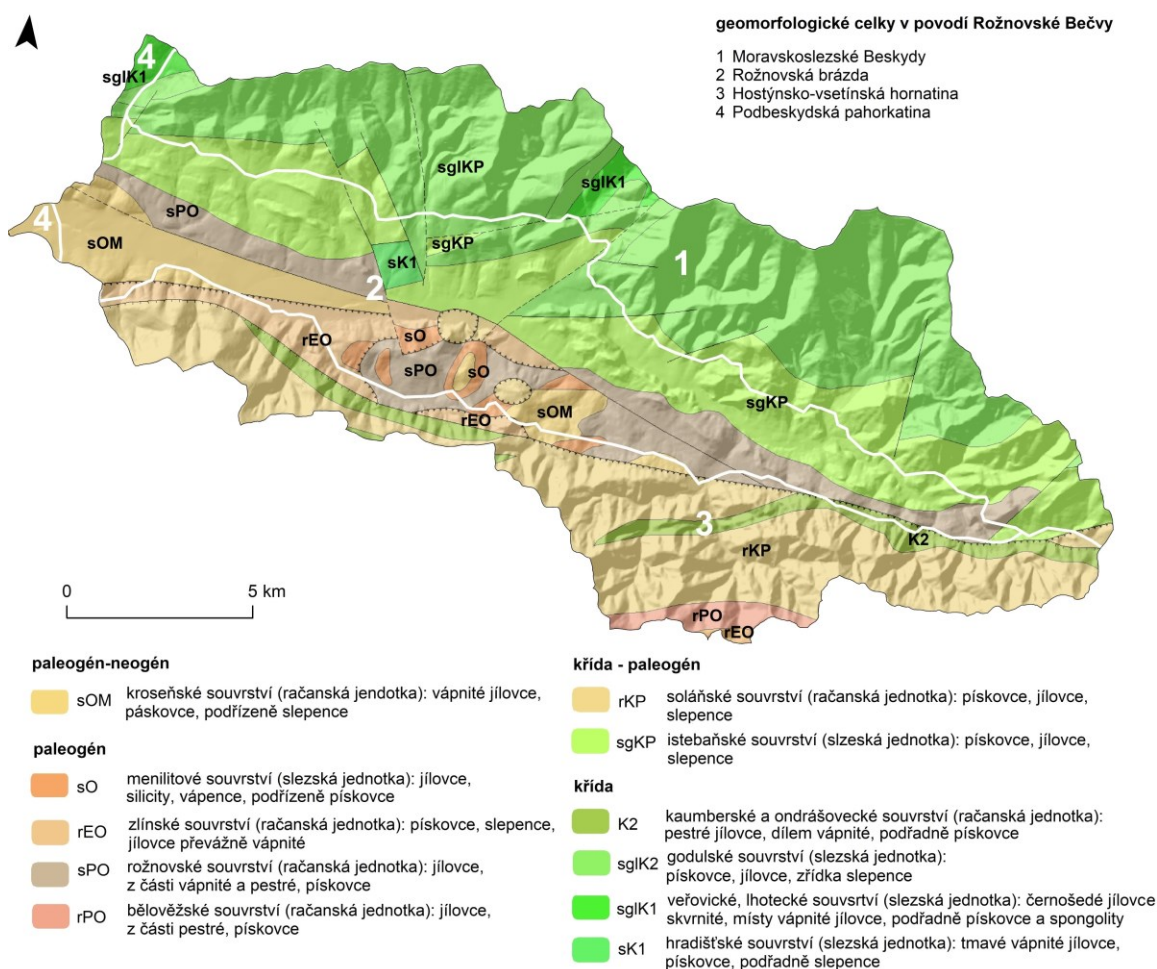
Zájmové území, které bylo vybráno pro simulaci vlivu navržených revitalizačních úprav na změnu retence vody v říční nivě, se nachází v povodí Rožnovské Bečvy o rozloze 254 km², které je situováno ve východní části České republiky v blízkosti hranic se Slovenskem; konkrétně ve Zlínském kraji, v okrese Vsetín, na hranicích s okresy Frýdek-Místek a Nový Jičín (Obr. 3.1). Spolu se Vsetínskou Bečvou tvoří na území ČR povodí 3. řádu nacházející se ve flyšovém pásmu Západních Karpat. Přibližně v lokalitě města Rožnov pod Radhoštěm probíhá povodím hranice CHKO Beskydy, která pokrývá více jak polovinu území až k pramenným úsekům Rožnovské Bečvy, včetně severní hranice povodí s hřebenem Moravskoslezských Beskyd. Jako hlavní předměty ochrany jsou vyhlášeny zbytky původních pralesovitých lesů, bučin, s výskytem vzácných karpatských živočichů a rostlin, druhově pestré louky a pastviny, výskyt pseudokrasových jevů a celkový krajinný ráz s mimořádnou estetickou hodnotou vznikající historickým soužitím člověka s horami (AOPK, 2019).



Obr. 3.1: Lokalizace a základní přehled zájmového povodí Rožnovské Bečvy

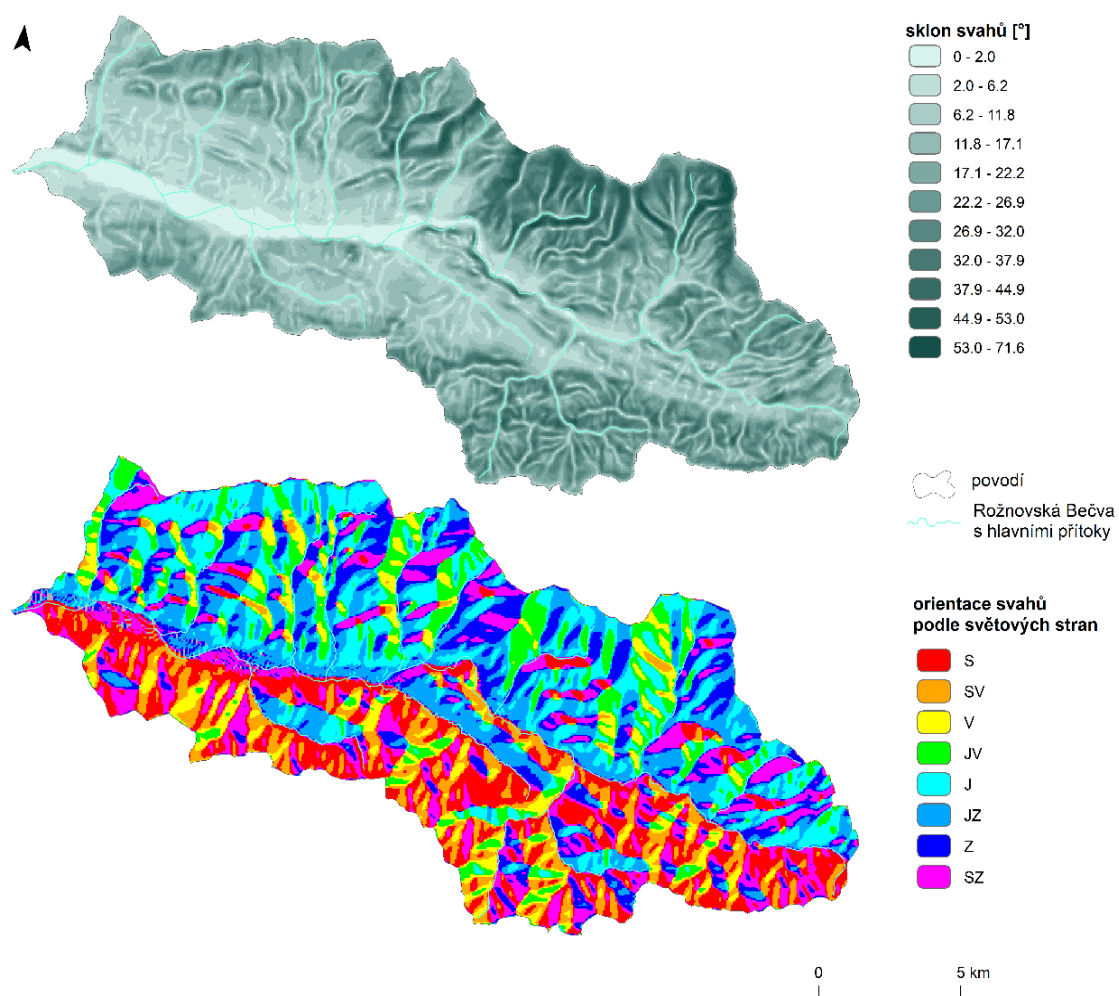
3.1. Geologické a geomorfologické poměry

Povodí Rožnovské Bečvy se nachází v oblasti Západních Beskyd ve flyšovém pásmu Vnějších Západních Karpat, které je součástí rozsáhlé soustavy mladých pásemných pohoří vytvořených během třetihorního alpinského vrásnění (PAVELKA, TREZNER, 2001; CHLUPÁČ et al., 2002). Předkvartérní podklad je tvořen vyvrásněnými flyšovými horninami, tedy souborem mořských sedimentárních hornin, který je charakteristický rytmickým střídáním pískovců, prachovců, slínovců, vzácně i vápenců a slepenců (PAVELKA, TREZNER, 2001). Z Obr. 3.2 je patrné rozdělení povodí podél příkrovového zlomu vedoucího středem povodí přibližně podél toku Rožnovské Bečvy (sz. směr) na dvě hlavní jednotky flyšového pásma, které se liší litologií i stářím hornin. Na sv. polovině povodí v Moravskoslezských Beskydech tvoří podklad slezská jednotka příkrovů flyšového pásma (jura–oligocén) převážně godulského (pískovce, jílovce, zřídka slepence) a istebaňského souvrství (pískovce, jílovce, slepence). Druhá jz. polovina povodí v Hostýnsko-vsetínské hornatině je tvořena račanskou jednotkou skupiny magurských příkrovů (spodní křída – spodní oligocén) s převahou soláňského souvrství. Střed povodí, který je protékán Rožnovskou Bečvou sledující trasu zlomové linie, se nachází v celku Rožnovské brázdy spadající převážně do račanské jednotky.



Obr. 3.2: Geologické poměry zájmového povodí Rožnovské Bečvy
Zdroj: ČGS (2019a)

Charakter horninového podloží je aktivně přetvářen erozí, což se promítá do velmi členitého reliéfu, který přechází z horských hřbetů vázaných na odolné pískovce a slepence do příkrých svahů členěných hustou údolní sítí s bystřinnými toky a stržemi (Obr. 3.3, nahoře), které jsou převážně tvořeny na méně odolných flyšových jílovcích a slínovcích, často zahloubenými až na skalní podloží (PAVELKA, TREZNER, 2001; GALIA, ŠKARPICH, 2013). Soubory těchto hornin tak tvoří strukturně-denudační a erozně-denudační reliéf na hřebenech a svazích, a akumulační a erozně-akumulační reliéf v kotlinách a údolních dnech. Kvarterní pokryv lokalizovaný na svazích představují hluboce zvětrané deluviální sedimenty s kamenitým, písčitým až hlinito-kamenitým a hlinito-písčitým charakterem náchylným ke vzniku svahových pohybů (DEMEK et al., 2006; KIRCHNER, KREJČÍ, 2002). V říčních údolích je kvarterní pokryv tvořen fluviálními, písčitými a štěrkovými sedimenty na povrchu s povodňovými hlínami.



Obr. 3.3: Sklonitost svahů (nahore) a orientace svahů (dole) v zájmovém povodí Rožnovské Bečvy

Z pohledu geomorfologického členění spadá povodí Rožnovské Bečvy do čtyř celků (Tab. 3.1). Severní polovina povodí, dělená tokem Rožnovské Bečvy, je součástí celku Moravskoslezských Beskyd, členité hornatiny, v povodí s převážně jižní orientací svahů, které v některých místech přesahují i sklon 70°, střední hodnota je však určena na 14,5° (DEMEK, MACKOVIČIN, 2006). Nachází se zde také nejvyšší bod povodí, Čertův mlýn (1205 m n. m.), lokalizován v sv. výběžku povodí, v subpovodí toku Kněhyně. Jižní polovina území spadá do celku Hostýnsko-vsetínské hornatiny. Střední sklon svahů je zde mírnější a nepřekračuje hodnotu 10°, svahy na hranici zájmového povodí zaujímají převážně severní expozici (Obr. 3.3, dole). Střed povodí leží ve sníženině celku Rožnovské Brázdy, kterou protéká Rožnovská Bečva, jejíž ústí (283,9 m n. m.) do Vsetínské Bečvy se však nachází až v celku Podbeskydské pahorkatiny, která na území povodí zasahuje jen minimálně (DEMEK, MACKOVIČIN, 2006).

Tab. 3.1: Geomorfologické členění zájmového povodí Rožnovské Bečvy dle Demka a Mackovičina (2006)

provincie	subprovincie	oblast	celek
Západní Karpaty	Vnější Západní Karpaty	Západní Beskydy	Moravskoslezské Beskydy
			Rožnovská Brázda
		Západobeskydské podhůří	Hostýnsko-vsetínská hornatina
			Podbeskydská pahorkatina

Analýzou DMR5G v prostředí aplikace ags.cuzk.cz byly zjištěny kromě mezních hodnot nadmořských výšek také procentuální zastoupení sklonitostních skupin svahů. Největší podíl ze 42,5 % zastávají sklony svahů v rozmezí 5–15°, tedy značně skloněné plochy, druhou nejvýznamnější skupinu z 28 % území tvoří svahy se sklonem mezi 15–25°, tedy příkře skloněné plochy. Tyto hodnoty jen potvrzují již výše zmíněné charakteristiky reliéfu s vysokou potenciální energií, které podmiňují vznik fenoménu svahových gravitačních procesů, typického pro flyšovou oblast (DEMEK et al., 2006; KIRCHNER, KREJČÍ, 2002)

3.2. Klimatické a hydrologické poměry

Klimatické poměry zkoumaného povodí jsou dány především jeho polohou v rámci mírného klimatického pásu na přechodu mezi oceánským a kontinentálním klimatem s převládajícím západním prouděním. Nevyšší průměrné měsíční teploty jsou zaznamenávány v červenci, nejnižší v lednu, maximální úhrny srážek se soustředí do období letních měsíců, s jejich minimem v zimě (BRÁZDIL, KIRCHNER, 2007). Vzhledem k malému prostorovému rozsahu povodí se však do charakteru klimatu vedle jeho polohy významně promítá také vliv reliéfu. Kdy vlivem návětrné polohy svahů a vzrůstající nadmořské výšky rostou také úhrny srážek (PAVELKA, TREZNER, 2001). Vliv nadmořské výšky je podchycen ve Quittově klasifikaci klimatických oblastí Česka (KVĚTOŇ et al., 2011), podle které povodí náleží do pěti oblastí, tří chladných a dvou mírně teplých (Tab. 3.2). Pomyslná hranice mezi chladnými a mírně teplými oblastmi probíhá přibližně mezi obcemi Prostřední a Dolní Bečva odkud se směrem k severní a jižní hranici vlivem vyšší nadmořské výšky ubírá podél hřebenů více na západ.

Tab. 3.2: Klimatické oblasti v povodí Rožnovské Bečvy dle klasifikace Quitta za období 1961–2000 (KVĚTOŇ et al., 2011)

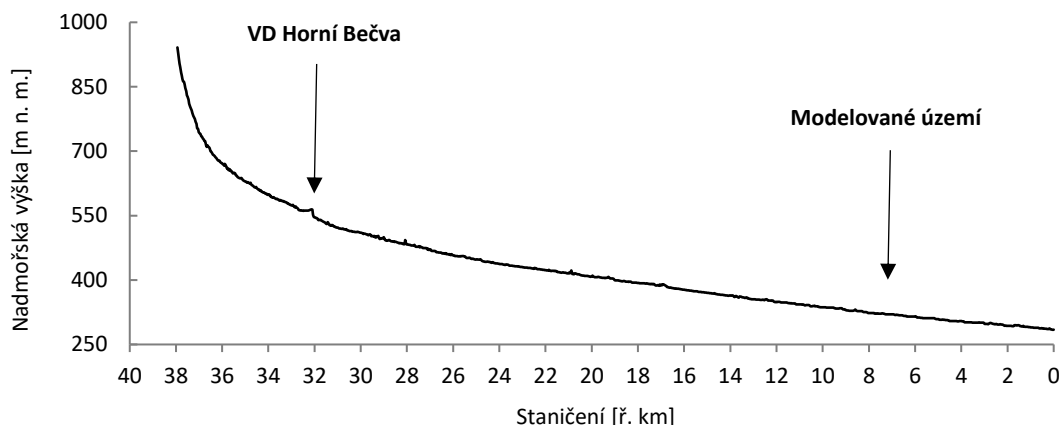
parametr	CH4	CH6	CH7	MT2	MT9
Počet letních dní	0 – 20	10 – 30	10 – 30	20 – 30	40 – 50
Počet dní s průměrnou teplotou 10°C a více	80 – 120	120 – 140	120 – 140	140 – 160	140 – 160
Počet dní s mrazem	160 – 180	140 – 160	140 – 160	110 – 130	110 – 130
Počet ledových dní	60 – 70	60 – 70	50 – 60	40 – 50	30 – 40
Průměrná lednová teplota	-7 – -6	-4 – -5	-3 – -4	-3 – -4	-3 – -4
Průměrná červencová teplota	12 – 14	14 – 15	15 – 16	16 – 17	17 – 18
Průměrná dubnová teplota	2 – 4	2 – 4	4 – 6	6 – 7	6 – 7
Průměrná říjnová teplota	4 – 5	5 – 6	6 – 7	6 – 7	7 – 8
Průměrný počet dní se srážkami 1 mm a více	120 – 140	140 – 160	120 – 130	120 – 130	100 – 120
Suma srážek ve vegetačním období	600 – 700	600 – 700	500 – 600	450 – 500	400 – 450
Suma srážek v zimním období	400 – 500	400 – 500	350 – 400	250 – 300	250 – 300
Počet dní se sněhovou pokrývkou	140 – 160	120 – 140	100 – 120	80 – 100	60 – 80
Počet zatažených dní	130 – 150	150 – 160	150 – 160	150 – 160	120 – 150
Počet jasných dní	30 – 40	40 – 50	40 – 50	40 – 50	40 – 50

Nejchladnější oblast povodí (CH4), která se nachází kolem vrcholu Vysoká (1024 m n. m.) na jižní hranici povodí v pramenné části, je charakterizována krátkým chladným a vlhkým létem a dlouhou a chladnou zimou s dlouhým trváním sněhové pokrývky dosahující až 160 dnů. Minimální průměrné roční teploty (4–5 °C) jsou však zaznamenány na protějším hřebenu povodí, a to v okolí vrchu Čertova mlýna, které je také nejbohatší lokalitou na srážky přesahující průměrné roční úhrny 1200 mm (TOLASZ et al., 2007). Oblasti CH6 a CH7 jsou přiřazeny horní polovině povodí a horským hřbetům na severní i jižní hranici povodí. Se snižující se nadmořskou výškou je pro oblasti typický rostoucí počet letních dnů, růst teplot a postupný pokles srážek i počet dnů se sněhovou pokrývkou. Údolí Rožnovské Bečvy přibližně mezi Valašským Meziříčím a hranicí mezi obcemi Prostřední a Dolní Bečva je řazeno do mírně teplé oblasti MT2, která vzhledem k ostatním klimatickým oblastem ČR charakterizuje léto stále jako krátké a vlhké, počet ledových dní však již zimu hodnotí jako normálně dlouhou, avšak stále chladnou s dlouhým trváním sněhové pokrývky. Jen nepatrná část povodí od města Valašské Meziříčí po ústí řeky je řazena do mírně teplé oblasti MT9 s více než dvojnásobným počtem letních dnů (maximální teplota alespoň 25 °C) oproti vrcholovým oblastem. Z celého povodí se tak jedná o lokalitu s nejvyššími hodnotami průměrných ročních teplot (8–9 °C) a nejnižšími průměrnými ročními úhrny srážek (700–800 mm).

Hydrologické poměry zájmového povodí jsou určeny jak klimatickými podmínkami, tak georeliéfem. Rožnovská Bečva je pravostranným přítokem Vsetínské Bečvy, se kterou tvoří povodí 3. řádu (4-11-01). Jejich soutokem vzniká tok Bečvy, která se vlévá u obce Troubky do řeky Moravy a představuje její nejvýznamnější levostranný přítok (PDP, 2015). Po severním hřbetu povodí Rožnovské Bečvy vede rozvodí dvou hlavních evropských úmoří. Na sever od hranic povodí jsou vody odváděny do Baltského moře, na jih od hranice náleží povodí Rožnovské Bečvy, tak jako celé povodí Moravy do úmoří Černého moře. Základní charakteristiky toku i povodí jsou uvedeny v Tab. 3.3.

Tab. 3.3: Základní charakteristiky toku Rožnovská Bečva a jeho povodí

délka [km]	sklon [°]	plocha povodí [km ²]	hustota říční sítě [km.km ⁻²]
37.98	1.30	254.19	2.17



Obr. 3.4: Podélný profil toku Rožnovská Bečva sestavený podle DMR 5G za využití aplikace „Analýza výškopisu“ (ČÚZK, 2015) s lokalizací VD Horní Bečva a modelovaného území

Pramen Rožnovské Bečvy se nachází pod vrcholem Vysoká, přibližně ve výšce 940 m n. m. (Obr. 3.4) v zalesněném území. Tok se dále ubírá sz. směrem s celkovou délkou 38,0 km. Vzhledem k uzavřenosti údolí a jeho rozčlenění stržemi a bystřinami má povodí jednu z nejvyšších hustot říční sítě v ČR, 2,2 km.km⁻² (VÚV TGM, 2017). Největším pravostranným přítokem Rožnovské Bečvy je podle délky Starozuberský potok (7,90 km), podle plochy povodí Kněhyně (18,40 km²). Největším levostranným přítokem je podle délky Házovický potok (8,04 km), podle plochy Solanecký potok (26,44 km²). Na toku Rožnovské Bečvy jsou instalovány dva hlásné profily, jejichž provozovatelem je ČHMÚ. První se nachází na 14,3 ř. km v Rožnově pod Radhoštěm (kategorie B) pokrývající 62,5 % plochy povodí, druhý na 1,4 ř. km ve Valašském Meziříčí (kategorie A), který pokrývá 99,0 % plochy povodí. Nejvýznamnější vodní plochou v povodí je VD Horní Bečva, situováno na 32,100 ř. km Rožnovské Bečvy. Dílo bylo uvedeno do provozu v roce 1947, a s objemem nádrže 665 tis. m³, slouží převážně k účelům snižování povodňových průtoků a nadlepšování průtoků pod nádrží pro vodárenský odběr, vedlejším účelem je i rekreační funkce (PMO, 2019). Vzhledem k tomu, že přehrada měla být součástí soustavy nádrží, která nebyla nikdy realizována, je její efekt na transformaci povodní pouze lokální s hlavním účinkem při průtocích Q5, kdy dochází k translaci povodně o více než 3 h (PAVELKA, TRENZER, 2001; ROMÁŠEK, 2007).

Tab. 3.4: Základní údaje o útvarech podzemních vod v povodí Rožnovské Bečvy a jejich přírodních charakteristikách (PDP, 2015)

Název útvaru PZV	Plocha [km ²]	Typ zvodnění	Mocnost kolektoru	Litologie	Typ hladiny	Typ propustnosti	Transmisivita [m ² .s ⁻¹]
Kvartér Horní Bečvy	12.7	souvislé	5 – 15 m	štěrkopísek	volná	průlinová	střední 1.10 ⁻⁴ –1.10 ⁻³
Flyš v povodí Bečvy	254.2	lokální	-	jílovce a slínovce	volná	průlinovo-puklinová	nízká <1.10 ⁻⁴

Z hydrogeologického pohledu spadá povodí Rožnovské Bečvy do dvou hydrogeologických rajonů. Prvním je plošně rozsáhlejší základní rajon flyše v povodí Bečvy, který se rozprostírá přes území horní a střední část povodí Bečvy a zabírá tak celou základní vrstvu zájmového povodí Rožnovské Bečvy. Druhým je svrchní rajon kvartéru Horní Bečvy, který do povodí zasahuje jen částečně přibližně v šířce nivního pásu Rožnovské Bečvy směrem od ústí až po oblast ohraničenou městem Rožnov pod Radhoštěm.

Horniny karpatského flyše jsou vlivem malé propustnosti charakteristické nepříznivými podmínkami pro výskyt a oběh podzemních vod, které jsou v měřítku ČR řazeny mezi hydrogeologické celky s nejnižší tvorbou přírodních zdrojů podzemních vod a nejvyšší rozkolísaností odtoku vůbec (KRÁSNÝ et al., 2012; TRPKOŠOVÁ, 2006). Hydrogeologické prostředí flyšového pásma tvoří regionálně rozšířený nespojitý kolektor, který je charakteristický průlinovou a puklinovou propustností s volnou hladinou podzemní vody. Je vázaný na přípovrchovou zónu zvětralin a rozevřených puklin, která zasahuje až do hloubky desítek metrů a představuje mnohem příznivější podmínky pro oběh podzemní vody, než je tomu v hlouběji položených zpevněných částech (Tab. 3.4). Právě míra zvětrání, rozpukání a tektonického porušení hornin ve flyšovém pásmu je hlavním faktorem ovlivňující prostorovou propustnost hydrogeologického prostředí než samotné litologické složení hornin, které se projevuje až jako druhořadé. Tradiční pojetí pískovců a slepenců coby hydrogeologických kolektorů a jílovitých sedimentů jako izolátorů ve flyšovém pásmu všeobecně neplatí. Nejméně propustné horniny představují vedle plastických pelitů právě mocné pískovcové sekvence, naproti tomu úseky tvořené střídajícími se tenkými rozpukanými polohami pískovců a jílovců jsou charakteristické vyšší mírou zvodnění (KRÁSNÝ et al., 2012).

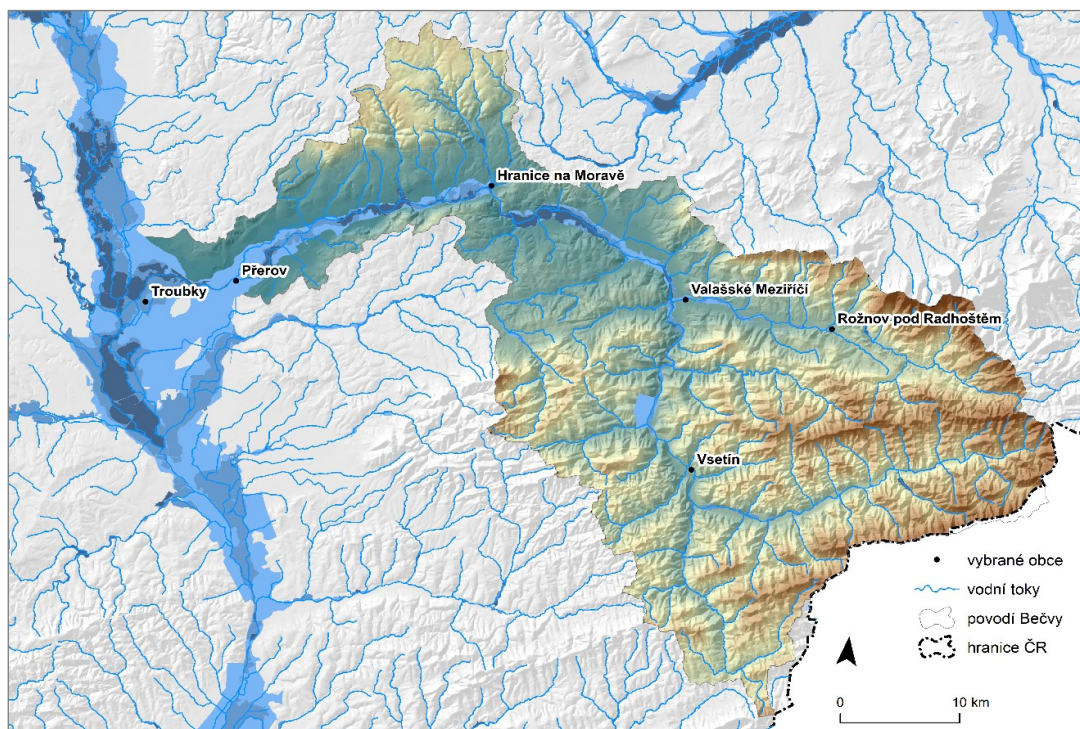
3.2.1. Odtokové poměry

K obecné charakteristice odtokových poměrů byly využity údaje z období 1931–1960 publikované v Horský et al. (1970), které jsou uvedeny v Tab. 3.5.

Tab. 3.5: Základní průměrné roční odtokové poměry řeky Rožnovská Bečva na stanici Rožnov pod Radhoštěm, povodí Moravy, Bečvy a celorepublikového průměru (HORSKÝ et al., 1970)

	srážky [mm]	odtok [mm]	rozdíl srážek a odtoku [mm]	specifický odtok [l/s.km ²]	součinitel odtoku [%]
Rožnovská Bečva	1014.0	544.0	470.0	17.3	50
Bečva ústí	847.0	339.0	508.0	10.8	40
Morava ústí	-	142.0	-	4.51	-
ČR	745.8	279.8	466.0	13.6	40

Jak je z tabulky 3.5 patrné, je povodí Rožnovské Bečvy z pohledu průměrných srážkových úhrnů na území ČR nadprůměrné, což se společně s hustotou říční sítě projevuje také v množství odtoku. Hodnota specifického odtoku Rožnovské Bečvy řadí povodí v porovnání s republikovým průměrem mezi jedny z nejvodnějších (VÚV TGM, 2017; PAVELKA, TREZNER, 2001) a ve srovnání s povodím Moravy, jsou hodnoty dokonce téměř 4x vyšší, což z povodí Bečvy činí jeden z nejvodnějších přítoků řeky Moravy



Obr. 3.5: Rozsah zaplavení při povodni v červenci roku 1997 v povodí Bečvy na soutoku s řekou Morava

Jelikož řeka Bečva svádí vodu z míst bohatých na dešťové srážky, významně ovlivňuje vodní režim na středním i dolním toku Moravy. Tato skutečnost se negativně projevuje během povodňových situací, jak se tomu stalo při povodni v roce 1997 s katastrofálními následky na soutoku Bečvy a Moravy v obci Troubky (Obr. 3.5).

Tab. 3.6: N-leté průtoky na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000)

N-letost	Q1	Q5	Q10	Q50	Q100
Q [m ³ .s ⁻¹]	42.8	99.1	134	241	301

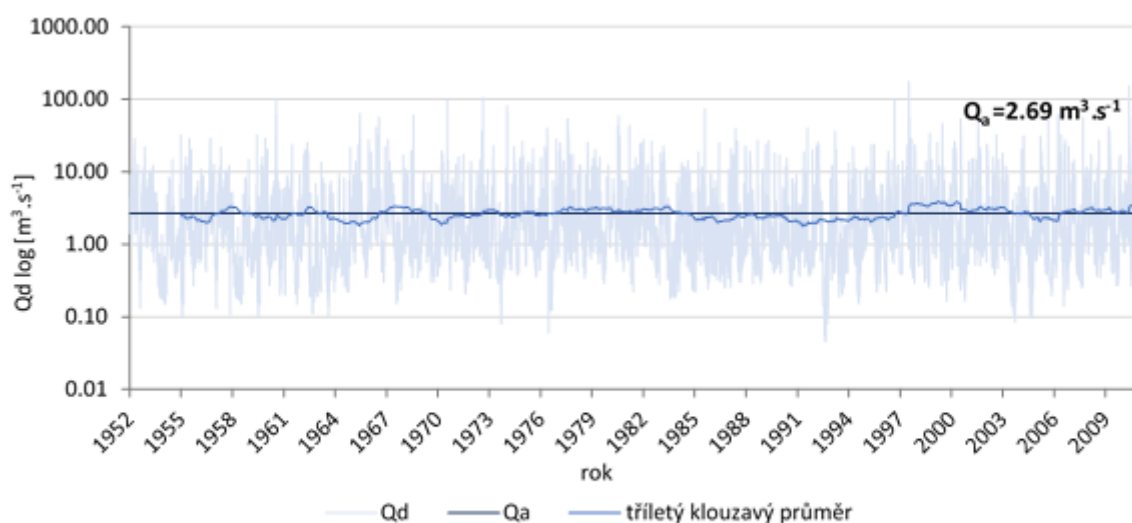
Propojení bohatých úhrnů srážek s málo propustným podložím stává povodí Rožnovské Bečvy mezi nejvodnější oblasti s nejvyšším faktorem urychleného odtoku z celého povodí Moravy (PDP, 2015; ROMÁŠEK, 2007). Právě vodnost povodí je jedním z důvodů, proč bylo území vyhlášeno jako CHOPAV (PAVELKA, TREZNER, 2001). Pro určení N-letých průtoků byly převzaty údaje z evidenčního listu profilu Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) (ČHMÚ, 2019), které jsou uvedeny v Tab. 3.6.

Variabilita denních průtoků

Pro zhodnocení podrobnějších odtokových charakteristik (variabilita průtoků, sezónnost a charakteristika povodní) byly využity hodnoty průměrných denních průtoků (Q_d) za období 1952–2010, které byly poskytnuty od ČHMÚ (2017b) ze stanice Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) lokalizované na 14,3000 ř. km Rožnovské Bečvy.

Tab. 3.7: M-denní průtoky na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

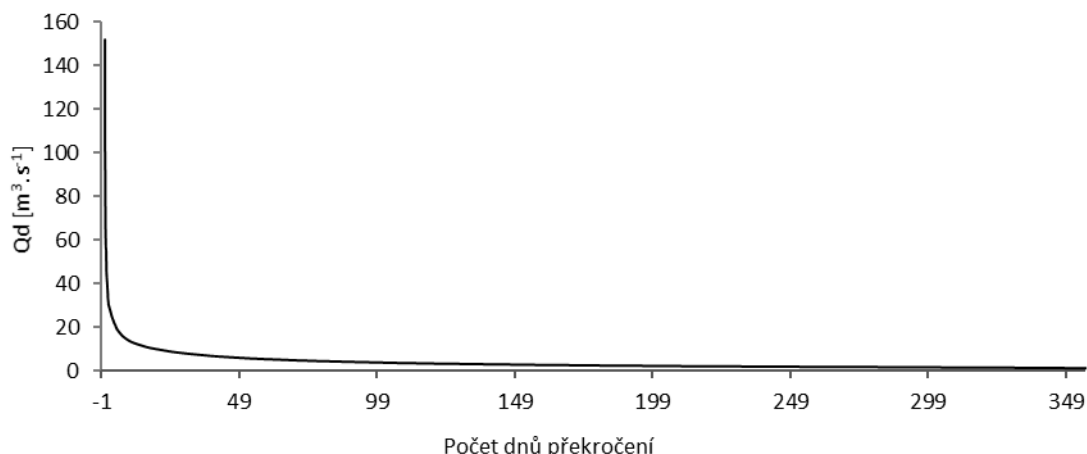
M-dny	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Q_d	7.07	5.23	4.39	3.87	3.51	3.25	3.04	2.87	2.72	2.60	2.50	2.42	2.39



Obr. 3.6: Hydrogram průměrných denních průtoků na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

Jako první byl zjištěn průměrný roční průtok ($Q_a = 2,69 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a hraniční hodnoty souboru. Maximální průměrný denní průtok ($Q_d = 177 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) byl zaznamenán během extrémní povodně 7. 7. 1997 způsobené v důsledku několikedenního trvání vydatných srážek. Minimální průtok ($Q_d = 0,045 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) byl zaznamenán v měsíci srpnu 1992, který patří do jednoho z nejvýznamnějších srážkově podnormálních suchých období 20. století postihující celou ČR (TREML, 2012; DAŇHELKA et al., 2015).

Z hydrogramu na Obr. 3.6 je možné usoudit na relativně vysokou variabilitu průměrných denních průtoků kolem střední hodnoty, kterou potvrzuje jak koeficient variace ($C_v = 1,85$), tak křivka překročení m-denních průtoků. Ta zobrazuje, po kolik dnů v roce byla daná hodnota průtoků dosažena či překročena, a jak je z Obr. 3.7 patrné, převládají v povodí v průběhu roku spíše nízké průtoky

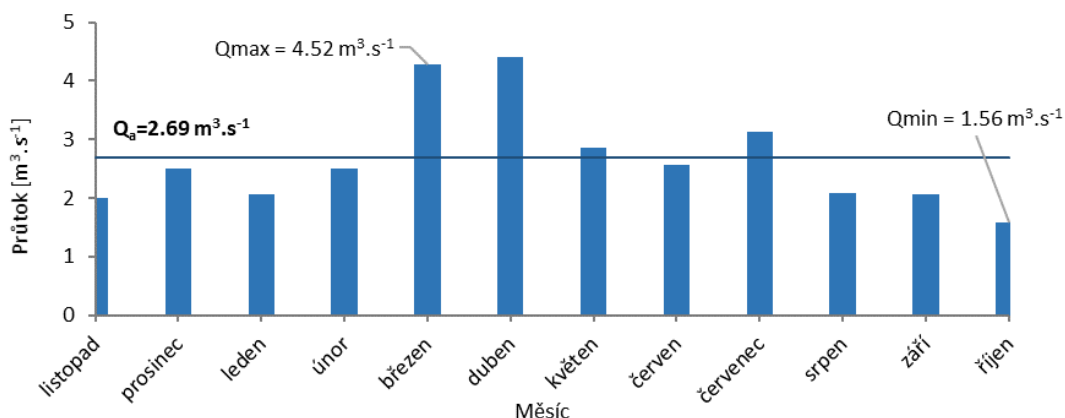


Obr. 3.7: Křivka překročení průměrných m-denních průtoků na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

Křivka překročení byla dále využita pro odečtení hodnot m-denních průtoků (Tab. 3.7). Rozkolísanost povrchového odtoku je ve flyšové oblasti Beskyd typickým jevem. Hlavní příčinou je kombinace kolísavých srážek a typu horninového podloží s nízkou akumulací schopností, způsobující rychlou odezvu na srážkové události ústící v extrémních případech ve vysoké hodnoty kulminačních průtoků, nebo naopak v hodnoty minimálních průtoků v období na srážky chudém (PDP, 2015; TRPKOŠOVÁ, 2006; TREZNER, PAVELKA, 2001; KRÁSNÝ, 2012)

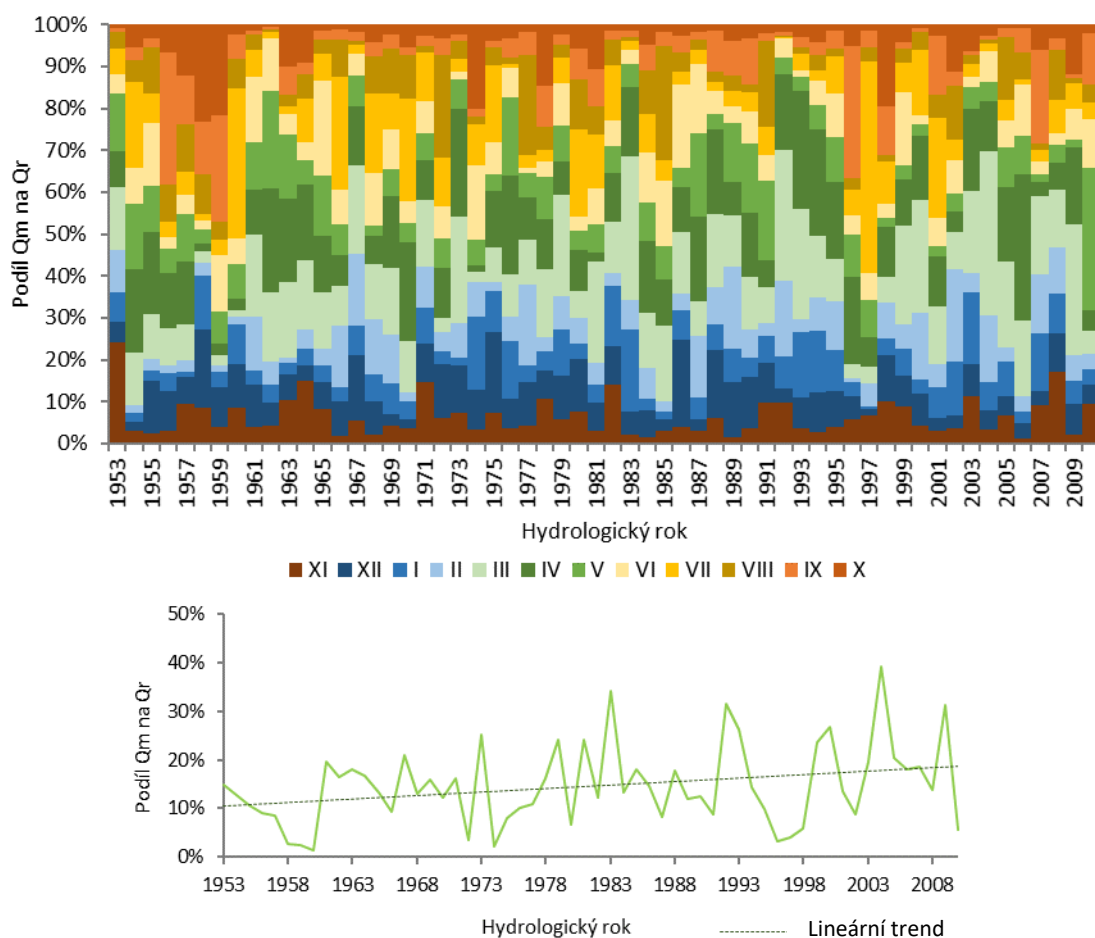
Variabilita měsíčních průtoků

Variabilita průměrných měsíčních průtoků (Q_m) je oproti Q_d relativně nižší, odtok je tedy z pohledu Q_m vyrovnanější, což vysvětluje také koeficient variace ($C_v = 0,33$) a koeficient $K_r = 3,02$, který nabývá hodnot od 0 (ideálně vyrovnaný odtok) po 22 (maximálně nevyrovnaný odtok).



Obr. 3.8: Průměrné měsíční průtoky na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

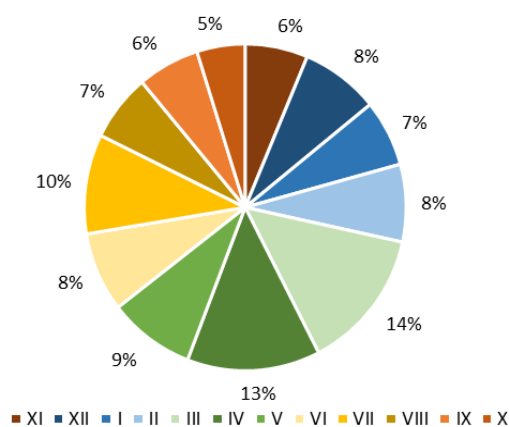
Z Obr. 3.8 je patrné rozložení hodnot Q_m . Maximální hodnoty průtoků jsou dosahovány v měsíci březnu ($Q_m = 4,52 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) v důsledku tání sněhové pokrývky či frontálních srážek. Nejnižší hodnoty Q_m jsou typické pro měsíc říjen ($Q_m = 1,56 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).



Obr. 3.10: Podíl průměrných měsíčních průtoků na ročním odtoku (nahore) a vývoj podílu měsíce března na průměrném ročním odtoku na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b) (dole)

Oscilace jednotlivých měsíců během sledovaného období jsou patrné z Obr. 3.10. Z těchto údajů byl na základě lineární regrese zjištěn statistický významný růst ($\alpha = 0,05$) měsíce března na celkovém odtoku, jako jediného z testovaných měsíců. Tuto skutečnost je možné vysvětlit, nárůstem kapalných srážek na úkor pevných v jarních měsících, a tedy i dřívějším odtokem z povodí (BRÁZDIL, TRNKA, 2015).

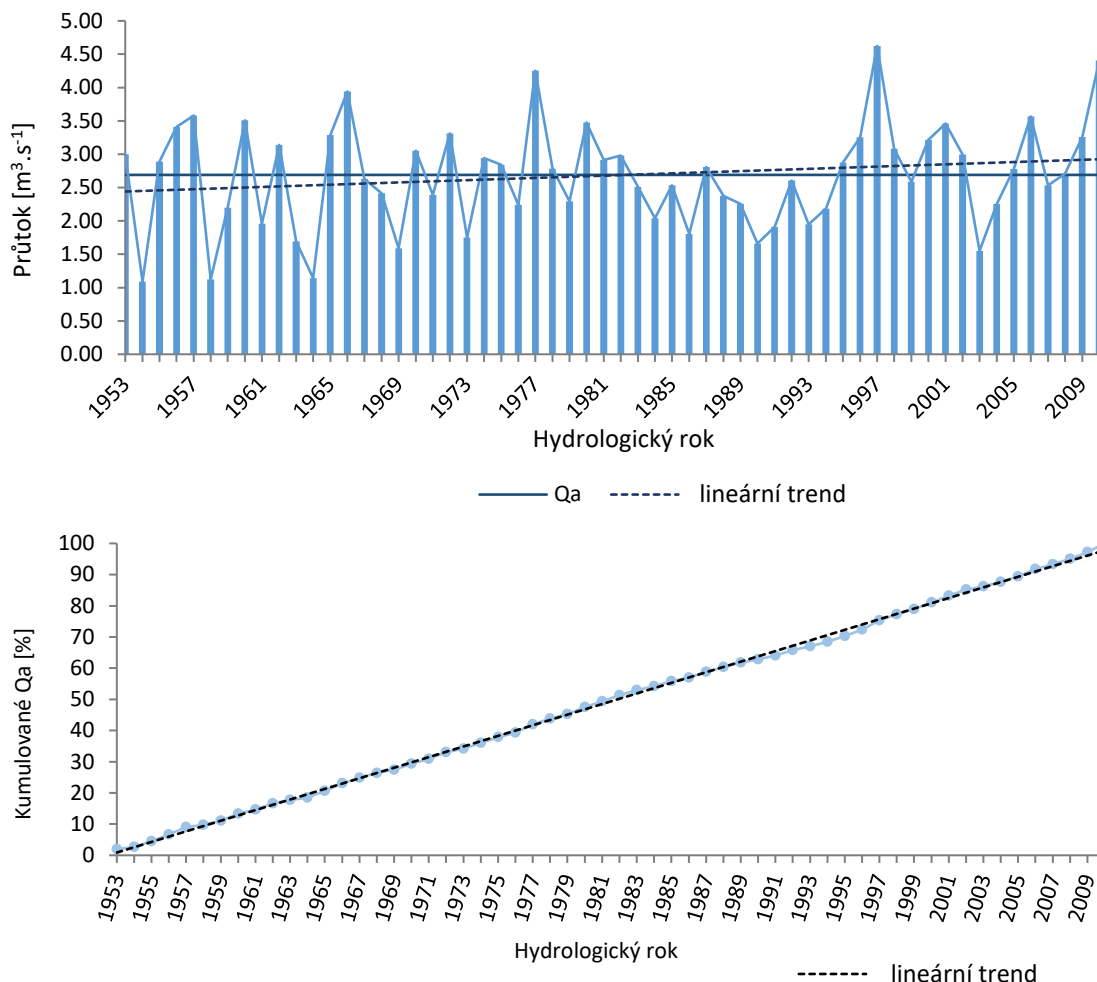
Podíl měsíců na celkovém odtoku je patrný z Obr. 3.9. Více než polovina odtoku probíhá v jarních (36 %) a letních (25 %) měsících, kdy v měsíci březnu dochází k vůbec největšímu podílu na odtoku (14 %). Nejmenší podíl odtoku (5 %) se odehrává v měsíci říjnu



Obr. 3.9: Podíl měsíčních průtoků na celkovém odtoku na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

Variabilita ročních průtoků

Pro znázornění variability ročních průtoků byly vyneseny průměrné roční průtoky zkoumaných let (Obr. 3.11, nahoře) a byla vytvořena jednoduchá součtová čára popisující změny v odtoku mírou odchýlení od přímky, která představuje ideálně vyrovnaný odtok (Obr. 3.11, dole).



Obr. 3.11: Průměrné roční průtoky s lineárním trendem (nahoře) a součtová čára průměrných ročních průtoků na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b) (dole)

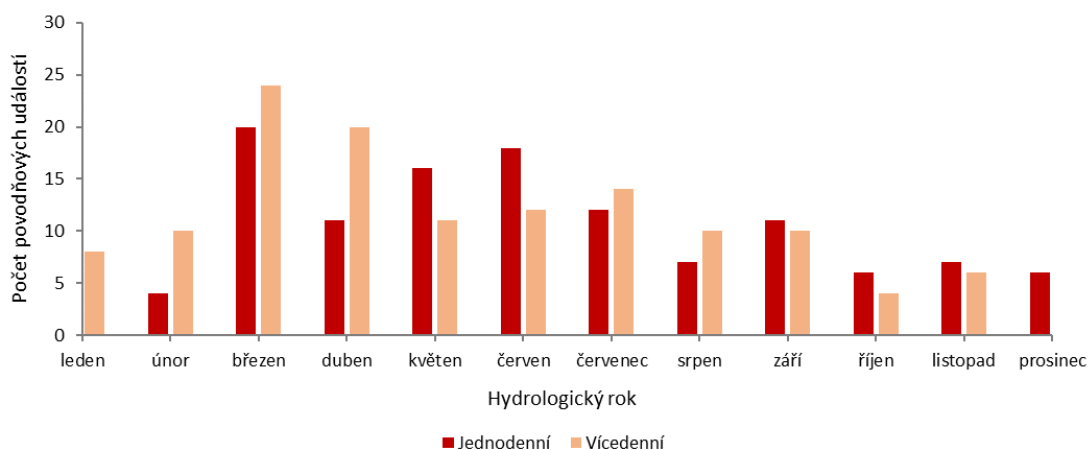
I přesto, že se křivka od lineárního trendu příliš nevzdaluje, je možné identifikovat několik abnormalit, které jsou patrné také na chodu průměrných ročních průtoků. Pozitivní odchýlení od lineárního trendu je pozorováno v letech 1957, 1960, 1966, 1977 či 2006. Výrazný pokles průtoků je patrný v období první poloviny 90. let, do kterého řazeny jedny z významných srážkově podprůměrných let, zasahující celou ČR, a které bylo k jeho konci narušeno extrémními povodněmi v roce 1997 (TREML, 2012; DAŇHELKA et al., 2015).

Sezónnost povodní

Pro zhodnocení sezónnosti povodní byla využita metodika dle Smith a Ward (1998), která stanovuje hraniční hodnotu průtoku určující povodňový stav v rámci měrného profilu. Ta pro profil Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) vychází $10,96 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Po určení hraniční hodnoty byly zjištěny informace o počtu jednodenních a vícedenních povodní a jejich rozložení během roku. Zastoupení povodňových událostí podle délky trvání je patrné z Obr. 3.12. Za sledované období bylo na základě hraniční hodnoty vymezeno 124 dnů jednodenních událostí a 141 dnů vícedenních událostí (Tab. 3.8).

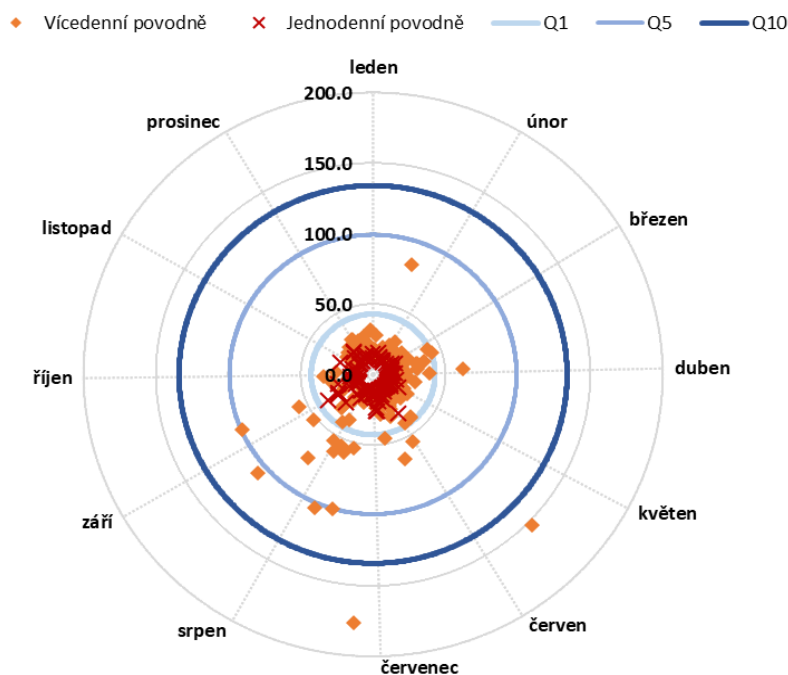
Tab. 3.8: Počet povodňových událostí za jednotlivé měsíce na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Suma
Jednodenní	6	4	20	11	16	18	12	7	11	6	7	6	124
Vícedenní	8	10	24	20	11	12	14	10	10	4	6	12	141
Suma	14	14	44	31	27	30	26	17	21	10	13	18	265



Obr. 3.12: Počet jednodenních a vícedenních povodní za jednotlivé měsíce na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

Nejčastější výskyt jednodenních i vícedenních povodňových událostí je soustředěn převážně do období jarních a letních měsíců. Významný počet jednodenních povodňových událostí je možné přikládat vlivu konvektivních bouřek s krátkodobými, ale intenzivním srážkám a jejich bezprostřednímu odtoku. Vícedenní události se objevují spíše v jarních měsících způsobených oblovou, táním sněhové pokrývky či frontálními srážkami.

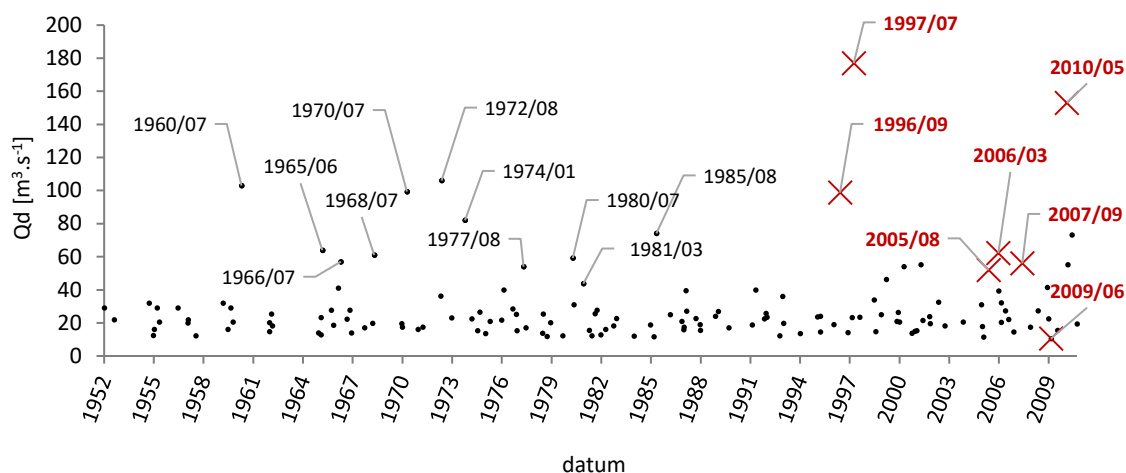


Obr. 3.13: Sezónnost jednodenních a vícedenních povodní na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

Sezónnost jednodenních povodní lze identifikovat podle nabývací intenzity povodňových událostí. Nejintenzivnější jednodenní události se vyskytují v období teplého půlroku (08/2010 ($Q_d = 35,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)) (Obr. 3.13). Jejich výskyt je však rozprostřen v průběhu celého roku (Obr. 3.13). Obdobný charakter rozložení povodní je patrný také u vícedenních povodní, které se vyskytují také v průběhu celého roku, jejich intenzita však nabývá výrazně vyšších hodnot. Nejvyšší hodnoty Q_d připadají na letní měsíce dosahující k hodnotám padesátileté povodně (05/2010 ($Q_d = 153 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), 07/1997 ($Q_d = 177 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)), je zde ale patrné vychýlení k vyšším hodnotám i během zimních a jarních měsíců, kdy se jedná o povodně způsobené obilovou či dešťovými srážkami (01/1974 ($Q_d = 82 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), 03/2006 ($Q_d = 62 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)).

Povodně na řece Rožnovská Bečva

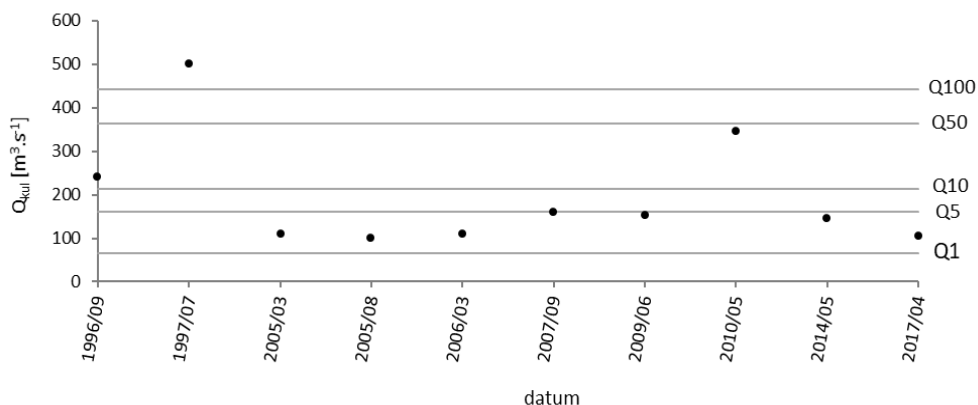
Určení povodňových událostí za využití hraniční hodnoty pomohlo objasnit charakter rozložení povodní na řece Rožnovská Bečva v průběhu roku, avšak jen zlomek z 265 identifikovaných událostí způsobil takovou povodeň, která by představovala riziko a dosáhla alespoň 1. SPA. Na Obr. 3.14 jsou uvedeny maximální hodnoty Q_d vícedenních povodňových událostí na stanici Rožnov pod Radhoštěm na 14,300 ř. km (ID 386000) za období 1951–2010 určených pomocí hraniční hodnoty



Obr. 3.14: Vícedenní povodňové události na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b) a jejich maximální hodnota Q_d . Povodňové události za zkoumané období popsané v Povodňových zprávách s hodnotou $Q_k > Q_1$ (profil Valašské Meziříčí, 387000), použité k bližšímu popisu viz níže (křížky červeně). Povodňové události bez záznamu v Povodňových zprávách (tečky) s vyznačenými událostmi překračující hodnotou $Q_d > Q_1$ (profil Rožnov pod Radhoštěm, 386000).

Pro bližší popis povodní na Rožnovské Bečvě bylo využito Povodňových zpráv od roku 1965–2018 zveřejněných na webových stránkách ČHMÚ (Obr. 3.14, červeně). Povodňové zprávy však nemohly být využity pro všechny identifikované události z datové série, a to buď z toho důvodu, že se povodně vyskytly v letech před zveřejněními Povodňovými zprávami (před rokem 1965) nebo ve zprávách nejsou zmíněny vůbec, a to i přesto, že maximální hodnoty Q_d těchto událostí přesahují hodnoty Q_d povodní, které v Povodňových zprávách uvedeny jsou. Vzhledem k absenci hodnot kulminačních průtoků (Q_k) některých povodňových událostí na stanici Rožnov pod Radhoštěm uvedených v Povodňových zprávách, byly u hodnocených povodní použity hodnoty Q_k ze stanice Valašské Meziříčí, které byly uvedeny u všech hodnocených povodní.

Z Povodňových zpráv bylo celkem vybráno deset povodňových událostí vyskytující se od roku 1965–2018 v zájmovém povodí, a jejichž Q_k překročil hodnotu Q_1 (Obr. 3.15). Ze zpráv byly zjištěny příčiny povodní, kulminační průtoky, doba opakování, a případně hodnota SPA.



Obr. 3.15: Kulminační průtoky povodňových událostí na stanici Valašské Meziříčí (387000) uvedených v Povodňových zprávách překračující alespoň hodnotu Q_1 .

Z Obr. 3.15 jsou patrné dvě nejvyšší hodnoty Q_k náležící povodňovým událostem, které zasáhly celou ČR. Jedná se o katastrofální povodeň z července 1997 ($Q_k = 500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), dosahující na stanici Valašské Meziříčí doby opakování Q_{150} a povodeň z května 2010 ($Q_k = 346 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), která dosáhla doby opakování Q_{20-50} . U obou případů se jedná o povodně způsobené podobnou synoptickou situací, kdy z oblasti centrálního Středomoří postupovala tlaková níže po tzv. dráze Vb přes Balkánský poloostrov a dále k severovýchodu, přinášející plošně poměrně rozsáhlé a velmi intenzivní srážky převážně trvalého charakteru (JONOV et al., 2010). Extrémity u povodně z roku 1997 byla zapříčiněna neobvyklou synoptickou situací, kdy typickému zpětnému ústupu tlakové níže sz. směrem bránila tlaková výše, postupující z oblasti nad Azorskými ostrovy směrem ke Skandinávii. Tato situace způsobila setrvání tlakové níže a zesílení tlakového gradientu mezi oběma tlakovými útvary, což vedlo i k zesílení projevu návětrného efektu svahů Beskyd.

Právě Rožnovská Bečva byla v roce 1997 z celého povodí Bečvy zasažena nejvíce, a to z toho důvodu, že pramenná část byla jedním z center nejvyššího úhrnu srážek (HLADNÝ, 1997). Třetí nejvýznamnější událostí je povodeň ze září 1996, která dosáhla hodnoty Q_{20} ($Q_k = 241 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Hlavní příčinou bylo orografické zesílení srážek na svazích Beskyd postupující okludující fronty, jejíž teplý sektor se nasouval na studený vzduch nad územím ČR, což způsobilo jeho rychlé ochlazení, nasycení a tvorbu výrazné srážkové oblasti (DOLEŽEL et al., 1996). Další povodňové události, které se vyskytly v letních měsících, již nenabývaly tak vysokých kulminačních průtoků, přesto však byla na některých stanicích dosažena hodnota 3. SPA. Mezi tyto události se řadí povodeň ze září 2007 ($Q_k = 159 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a června 2009 ($Q_k = 153 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). V prvním případě byly povodně vyvolány frontálními srážkami putující ze sz., které byly umocněny návětrnými svahy se sz. orientací (ČHMÚ, 2007). U druhé události se jednalo o východní cyklonální situaci, která však trvala neobvykle dlouho (12 dní, běžně 3 až 4 dny). Intenzivní srážky způsobily izolované lokální povodně, kterými byly zasaženy především menší toky, v zájmovém území se jednalo především o spodní část povodí, v horní polovině nebyl zaznamenán ani 1. SPA (KUBÁT, 2009). Srpnová povodeň roku 2005 způsobila dosažení hodnot 2. SPA a doby opakování $<Q_2$, zapříčiněná pomalým ústupem brázdy nízkého tlaku vzduchu směrem na východ v kombinaci se zesilujícím efektem návětrných svahů (ČHMÚ, 2005).

V posledních pěti letech byly zaznamenány dvě květnové povodně, dosahující 2. SPA, a to v roce 2014 ($Q_k = 145 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a 2019. Událost z roku 2014 byla zapříčiněna postupující tlakovou níží z oblasti Balkánského poloostrova přinášející srážky, jejichž významné hodnoty byly dosaženy především na severních návětrných svazích Beskyd. Vzhledem k předcházejícímu suchému období a minimální nasycenosti většiny povodí nebyla odtoková reakce nijak mimořádná, výjimku zde však představovala právě Rožnovská Bečva, kde byl dosažen přibližně 5letý průtok (ČHMÚ, 2014).

Povodně v období jarních měsíců jsou převážně smíšeného charakteru. Vzhledem k hornatosti povodí, disponuje území potenciálem pro tvorbu dostatečné sněhové pokrývky dostupné při jarním tání. Tak tomu bylo u událostí v březnu 2005 ($Q_k = 56,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a 2006 ($Q_k = 110,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), kdy dostatečné zásoby sněhu v kombinaci přísunem teplého vzduchu způsobili urychlení tání sněhové pokrývky a následné rozvodnění toků (ČHMÚ, 2005;

KAŠPÁREK, 2006). Situace z dubna 2017 ($Q_k = 105,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) byla způsobena jednak přechodem tlakové níže, jednak extrémní nasyceností povodí v oblasti Beskyd (ČHMÚ, 2017a).

3.3. Půdní a vegetační poměry

V zájmovém povodí je možné z půdních map 1:50 000 (ČGS, 2019b) určit šest hlavních půdních typů, a to kambizemě (subtypy modální, slabě oglejené, oglejené mesobasické, mesobasické, dystrické rankerové, podzolové), fluvizemě (modální, glejové), kryptopodzoly (modální, rankerové), luvizemě (modální, oglejené), gleje (fluvické) a pseudogleje (modální) (ČGS, 2019b). Vrcholové oblasti hřebenů na severní hranici povodí, mezi vrcholy Radhošť a Čertův mlýn jsou vzhledem k přírodním podmínkám typické výskytem kryptopodzolů modálních. Chladné a vlhké klima společně s kyselými horninami pískovců a slepenců přispívá k intenzivnímu půdnímu zvětrávání za výrazného uvolňování seskvioxidů (Fe, Al) vytvářející typický rezivý horizont (TKSP ČR, 2004; TOMÁŠEK, 2003).

Dominantním půdním typem v povodí jsou kambizemě, s převážným výskytem ve svažitých oblastech s typickým brunifikovaným horizontem vzniklým zvětráváním silikátů v kyselých půdách (TOMÁŠEK, 2003; TKSP ČR, 2004). Dystrický subtyp kambizemí (nasycenost hliníkem >30 %) byl v povodí identifikován pod hřebeny na antiklinálních svazích, v synklinálách je možné nalézt subtyp rankerový mesobazický charakteristický pro silně skeletovité svahoviny. Druhým nejrozšířenějším půdním typem jsou fluvizemě, které dominují téměř celé údolní nivě. Jedná se o půdy tvořené povodňovými sedimenty, s vysokou hladinou podzemní vody, zrnitostně proměnlivé, často ohraničující rozsah maximálního zaplavení, které se v historii povodí odehrálo (PAVELKA, TREZNER, 2001; TOMÁŠEK, 2003). V pramenné části (přibližně od VD Horní Bečva k prameni) přecházejí fluvizemě v gleje fluvické. Výskyt pseudoglejů je plošně významný podél Hážovického potoka. Ve střední části povodí pod jeho severní hranicí je možné nalézt luvizemě oglejené se zhutnělým, na jíly bohatým horizontem, jen málo propustným pro vodu (TOMÁŠEK, 2003; TKSP ČR, 2004).

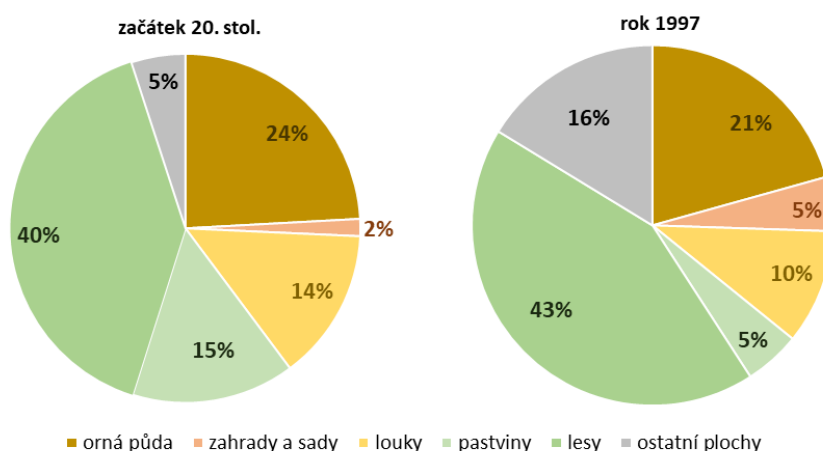
Z biogeografického hlediska spadá povodí do dvou hlavních bioregionů, a to Beskydského bioregionu na SV a Vsetínského bioregionu na JZ povodí, mezi kterými probíhá hranice přibližně podél toku Rožnovské Bečvy. Do ústí povodí zasahuje také výběžek Podbeskydského bioregionu, avšak vzhledem k tomu, že tento úsek pokrývá pouze intravilán města Valašské Meziříčí, je možné se domnívat, že charakteristiky bioregionu zde nebudou platné. Rozsah vegetačních stupňů je udáván od 4. (bukový) – 7. (smrkový) stupně. Potenciální přirozená vegetace by měla být tvořena společenstvy listnatých a smíšených lesů, v menší míře společenstvy lesů jehličnatých (AOPK, 2017; CULEK, 1996). Jedním z potenciálních společenství jsou květnaté bučiny, které zasahují do středních až vyšších poloh (CHYTRÝ et al., 2010). Jejich částečné zachování je možné pozorovat např. v NPR Radhošť, s plošně nejrozšířenější bučinou s kyčelnicí devítilistou. Ve stromovém patře zde dominuje buk lesní (*Fagus sylvatica*) s příměsí javoru klenu (*Acer pseudoplatanus*) a jedle bělokoré (*Abies alba*). Dalším potenciálním společenstvím jsou acidofilní bučiny vyskytující se na minerálně chudých horninách, které je z oblasti radhošťské skupiny Moravskoslezských Beskyd možné nalézt právě v povodí Rožnovské Bečvy (AOPK, 2017). Nejvyšší polohy jsou typické pro výskyt horských acidofilních bučin

s ojedinělým výskytem kapradinových smrčín, jejichž zbytky jsou zachovány v NPR Radhošť a NPR Kněhyně – Čertův mlýn, s převahou smrku ztepilého (*Picea abies*), který spolu s jeřábem ptačím (*Sorbus aucuparia*) vytváří rozvolněné nízkokmenné porosty stromového patra. Bylinné patro je charakteristické vysokou pokryvností s dominancí papratky horské (*Athyrium distentifolium*). Plošně malá, zato ekologicky významná jsou společenstva suťových a roklinových lesů (AOPK, 2017; CULEK, 1996; CHYTRÝ et al., 2010). Jejich výskyt je vázán na prudké balvanité svahy většinou na kontaktu s květnatými bučinami, se zastoupením javoru klenu, jilmu horského, jasanu ztepilého, buku lesního, které také zmlazují keřové patro. Tyto lokality jsou v povodí zastoupeny na území NPR Radhošť, PR Huštýn a PR Trojačka, s výskytem kriticky ohrožené kapradiny jelení jazyk celolistý (*Phyllitis scolopendrium*). Bez regulací vodních toků by byl v zájmovém povodí typický výskyt karpatského fenoménu divočících řek s výskytem společenstev křovin šterkových lavic (*Salicion eleagno-daphnoidis*).

Na krajinném rázu se výrazně podepsala valašská kolonizace, kdy došlo k významnému odlesnění území a vytvoření charakteristické mozaiky lesů, polí a pastvin charakteristických výskytem tzv. jalovcových pasínek, s někde až stovkami roztroušených keřů jalovce obecného (*Juniperus communis*). V současnosti se však trend ubírá opačným směrem, nad nelesní vegetací převažuje vegetace lesní, s nevhodnou výsadbou plošně významných smrkových monokultur, náchylných ke znečištění imisemi či napadení dřevokazným hmyzem vedoucí ke kalamitním těžbám (PAVELKA, TREZNER, 2001; AOPK, 2017).

3.4. Využití území

Způsob využití půdy hraje významnou roli v problematice retence vody a ovlivňování intenzity odtokových procesů (BIČÍK et al., 2008). Povodí Rožnovské a Vsetínské Bečvy doznalo od počátku jejich osidlování, proti celému území ČR, jedné z nejvýznamnějších proměn, kdy v průběhu 155 let (1845–2000) došlo ke změně ve využití půdy až na 38 % celého území (BIČÍK et al., 2008).



Obr. 3.16: Zastoupení typů využití půdy na začátku 20. stol. a v roce 1997 v povodí Rožnovské Bečvy. Ostatní plochy (vodní plochy, urbanizované a industriální plochy).
(upraveno podle: Románková, 2010)

Stálé osídlení v povodí Rožnovské Bečvy je datováno do 13. století, kdyby byla ještě většina povodí pokryta rozsáhlými a špatně prostupnými lesy. Až od 16. století se však začal projevovat zásadní dopad lidské činnosti na okolní biotu. S rozvojem obcí v podhorských oblastech byly postupně přeměňovány lesní porosty na ornou půdu a paseky, což bylo později následováno valašskou kolonizací, která prostupovala až do vrcholových poloh, kde již nebyly lesy mýceny za účelem získání orné půdy, ale vytvoření pasek k salašnickému chovu dobytka.

Tento způsob obhospodařování půdy vedl k vytvoření typického mozaikovitého rázu krajiny, kde zemědělskou krajinu střídaly rozptýlené prvky zeleně s drobnými selskými lesy a loukami (PAVELKA, TREZNER, 2001; BIČÍK et al., 2008). Nárůst zemědělských ploch pokračoval až dokonce 19. stol. (BIČÍK et al., 2008). Od první poloviny 20. stol. však docházelo ke změně sídelní struktury, rozvoji tržního hospodářství a poklesu počtu samot se soběstačným způsobem hospodaření. Orná půda byla nahrazena trvalými travními porosty (TTP) (louky, pastviny) nebo lesy, jejichž nárůst pokračoval až do současnosti (Obr. 3.16). Lesní porosty byly složeny převážně ze smrkových monokultur soustředěných hlavně do pramenných oblastí (PAVELKA, TREZNER, 2001), jak je patrné také z Obr. 3.17, a to i přesto, že se převážná část povodí nachází ve vegetačních stupních s převahou buku (CULEK, 1996). Nejzásadnější změny, které však ovlivnily stav přírody až do současnosti, nastaly s rozvojem socialistické výroby v oblasti zemědělství. Převážně v 60. letech 20. století, kdy bylo hospodaření soustředěno pod



Obr. 3.17: Změny v zalesnění pramenné oblasti povodí Rožnovské Bečvy na území obce Horní Bečva v 50. letech 20. stol. (nahore) a v současnosti (dole)
(převzato z: Geoportal Inspire, 2019a)

jednotným hospodářským družstvem, docházelo ke scelování pozemků, rušení mezí, likvidaci rozptýlené zeleně a aplikaci melioračních opatření za účelem zvýšení výnosů půdy (Obr. 3.17), což s sebou vedle jiných negativních dopadů na stav krajiny neslo i riziko urychleného odtoku (BIČÍK et al., 2008)

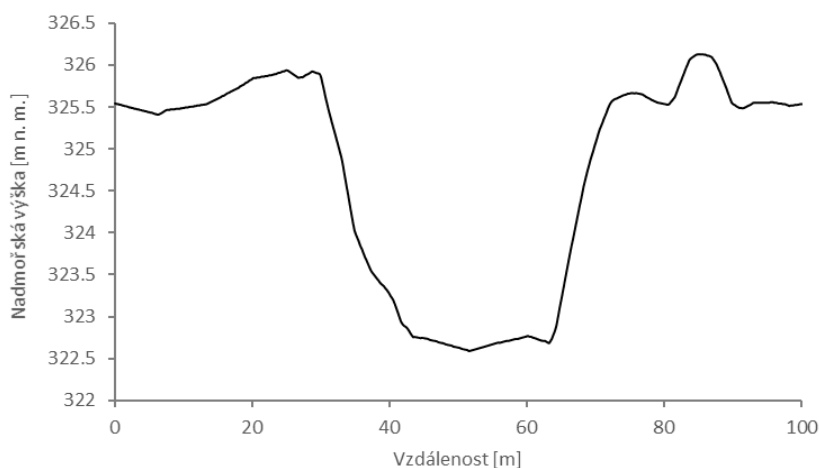
Negativním aspektem byl také výrazný pokles TTP, sehrávající významnou roli při retenci vody v krajině, jejichž podíl od počátku 20. stol. poklesl až o polovinu (Obr. 3.16). Jedněmi z vlivů je snížení chovu dobytka na volných pastvinách, jejich soustředěním do velkochovů a transformací TTP na ornou půdu sloužící pro produkci krmiv. Další významnou kategorií, na jejíž úkor dochází k poklesu TTP, je rozšiřování urbanizovaných a industriálních ploch, jejichž podíl se navýšil za posledních 155 let o cca 11 % (Obr. 3.16) (PAVELKA, TREZNER, 2001).

3.5. Problematika retence v říční nivě v povodí Rožnovské Bečvy

3.5.1. Možné příčiny ovlivňující míru retence vody v říční nivě

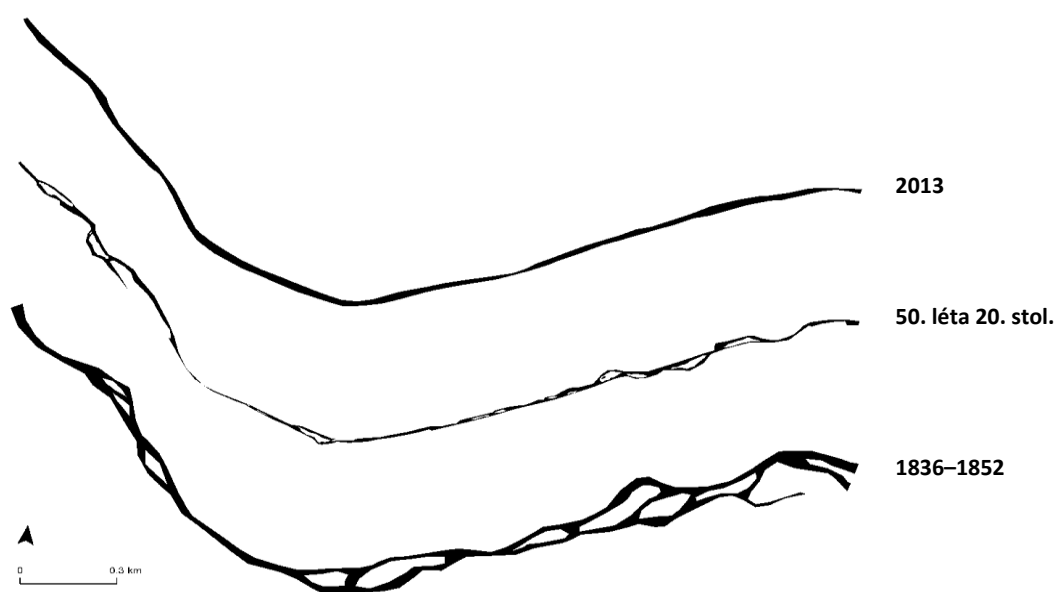
Regulace toků a změny využití území

Usměrňování koryt v zájmovém povodí započalo s využíváním vodní energie, avšak vzhledem k nestálosti koryta byly stavěny pouze lehké konstrukce za využití kamenného a vegetačního materiálu (např. haťošterkové válce, kamenné záhozy), které musely být po povodních znovu obnovovány (PAVELKA, TREZNER, 2001). Stavba komunikací, zvyšující se hustota osídlení a nároky na rozšíření zemědělské produkce vedly na počátku 20. stol. k systematické regulaci a stavbě opevnění z odolnějšího materiálu představující i větší povodňové události (PAVELKA, TREZNER, 2001; ČERMÁK, 2010). Dalším faktorem podmiňujícím v minulosti usměrňování Rožnovské Bečvy do jednotného koryta byly dopady hospodaření v krajině. Kontinuální odlesňování a přeměna lesní půdy na ornou vedly ke zvýšené náchylnosti půdy k erozi, tvorbě sesuvů a strží způsobující vyšší přísun šterků do vodního toku, ve kterých řeka začala rozšiřovat své koryto do takové míry ohrožující majetek i ve vzdálenějších částech údolí. Řešením, tak byly regulace koryta a počáteční výsadby lesních porostů (ČERMÁK, 2010).



Obr. 3.18: Příčný profil současného koryta Rožnovské Bečvy na 7.761 ř. km získaný z DMR 5G

Realizovaná opatření sice dokázala zabránit migraci koryta a umožnila rozšířené využívání půdy a ploch v údolní nivě, nesla však s sebou řadu negativních dopadů, ovlivňující převážně splaveninový režim řeky. Rožnovská Bečva je tak jako řada karpatských řek kvůli snadno erodovatelnému měkkému skalnímu podloží řazena mezi šterkonosné toky (ČERMÁK, 2010; ŠKARPICH et al., 2016a; ŠINDLAR et al., 2012). Splaveninový režim šterkonosných řek je závislý na pravidelném přísunu sedimentů ze zdrojových erozních částí, z přítoků i z vlastních koryt působením břehové eroze. Šterk je dále transportován řečištěm, ve kterém si řeky budují své koryto, a které v případě Rožnovské Bečvy dosahovalo místy dříve až stovky metrů (ŠKARPICH et al., 2016a; ČERMÁK, 2010). Právě závislost na pravidelné dotaci šterků zapříčiňuje u šterkonosných řek vysokou citlivost na jakékoliv změny ve splaveninovém režimu, které se mohou projevit v charakteru řečiště již v průběhu několika dekád (FERGUSON, 1993).



Obr. 3.19: Schématická ukázka vývoje říčního vzoru řeky Rožnovská Bečva mezi 5,8 až 8,5 ř. km v období od let 1836–1852 do roku 2013

Zdroj podkladových dat: Geoportál Inspire (2019a, b)

I přes soustavnou regulaci si Rožnovská Bečva zachovala charakter šterkonosného toku až do počátku 20. stol. Od této doby se začal postupně měnit její říční vzor z rozvětveného mělkého koryta se šterkovými lavicemi v jednotné zahloubené koryto (Obr. 3.19). Ještě v 50. letech je patrný jistý náznak charakteristického vývoje v jinak téměř celkově regulovaném korytě, kdy jsou již na toku postaveny hlavní vzdouvací prvky, které jsou přítomny dodnes.

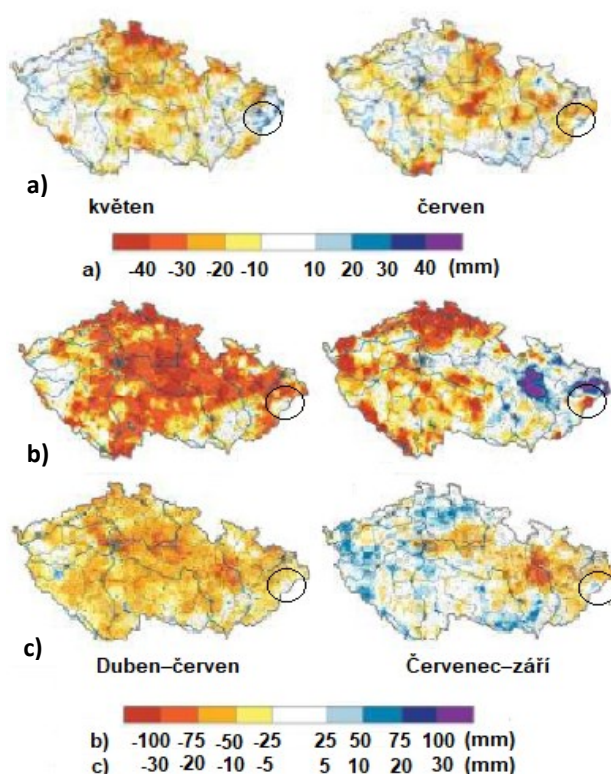
Koncentrace toku do jednotného koryta měla na Rožnovské Bečvě jeden hlavní důsledek, a to zkrácení délky toku, které za posledních 200 let dosahuje téměř 20 %. V 19. století, kdy byl tok blízký svému přirozenému charakteru, dosahovala jeho délka 45,4 km, v současnosti délka toku činí 38,0 km. Řeka tak ztratila na své délce 8,4 km. Zkrácení délky toku však podmiňuje významný negativní efekt, a to urychleného odtoku a zvýšení energie vody. Tento důsledek je vlivem břehového opevnění toku a hrazení bystřinných přítoků umocněn v karpatských pohořích omezením přísunu transportovatelného sedimentu do řečiště, mající za následek zvýšení erozní

síly vody soustředěné na dno říčního koryta, a tedy i jeho zahlubování (ŠKARPICH et al., 2016a; WYZGA, 1993), které v současnosti činí více než 3 m (Obr. 3.18). V počátcích regulací se předpokládalo, že zahlubování koryta ustane po dosažení skalního dna, avšak kombinace málo odolných hornin, vody, vzduchu a mrazu způsobilo jeho postupný rozpad a pokračující, i když pomalejší, zahlubování (PAVELKA, TREZNER, 2001). Omezení efektu setrvalého zahlubování bylo řešeno stavbou kamenných, později železobetonových jezů. Přítomnost jezů však vede ke zpomalení proudění v toku, ukládání štěrků v oblasti vzdutí a jejich absenci dále po toku, převážně v oblasti podjezí, kde voda disponuje vyšší energií a způsobuje vymílání dna, a jeho opětovnému zahlubování (ŠKARPICH et al., 2016a; ČERMÁK, 2010). Výsledným efektem regulačních opatření je tak celkové narušení splaveninového režimu vedoucí k soustavnému zahlubování toku, urychlenému odtoku, omezení komunikace toku s říční nivou způsobené limitováním rozlivů ze zahloubeného koryta do inundace a postupnému poklesu hladiny podzemní vody společně s poklesem dna v korytě (ČERMÁK, 2010; LANGHAMMER, 2007; ŠKARPICH et al., 2016a; ŠKARPICH et al., 2016b; WYZGA, 1993).

Klimatický faktor

Hodnocení dopadů klimatických změn v zájmovém povodí nelze jednoznačně určit, avšak na základě studie Brázdil, Trnka et al. (2015) je možné vyzvednout několik charakteristik poukazující na možné trendy ovlivňující retenci vody v říční nivě zájmového povodí.

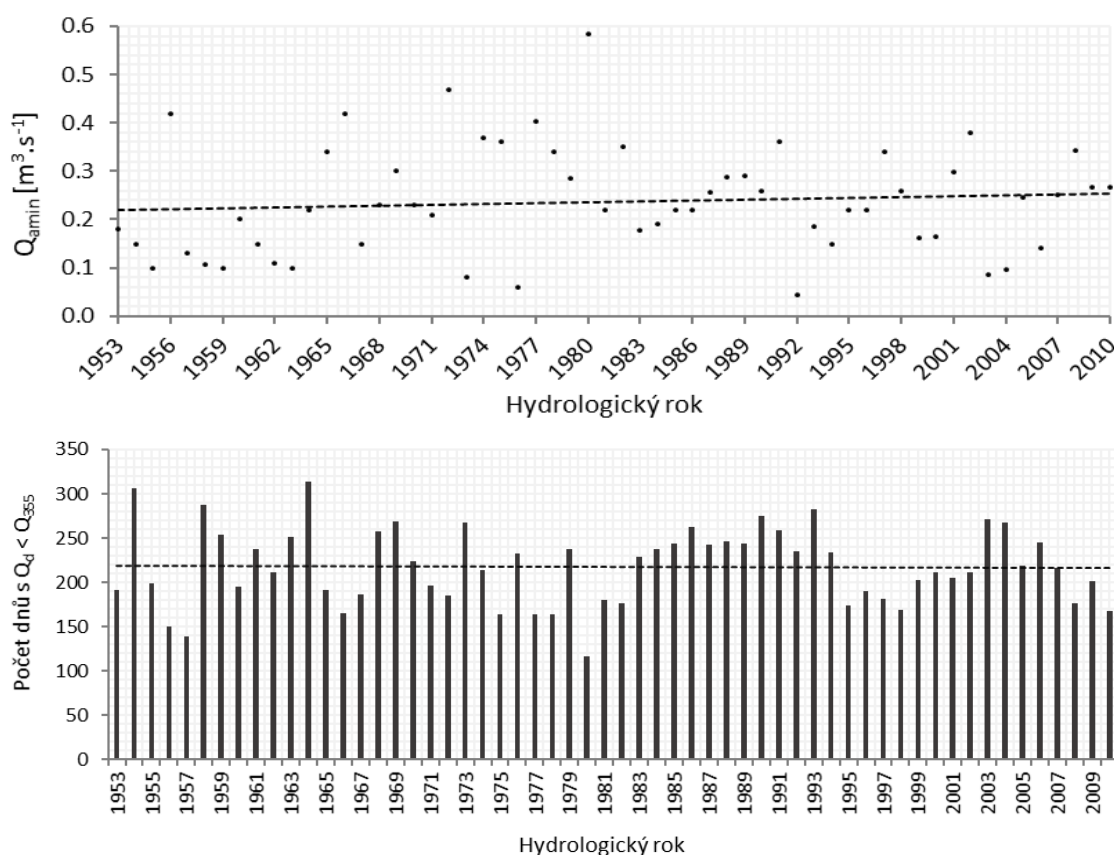
Zásadním jevem postihující celou ČR, je růst teploty, který v průběhu více než 50 let (1961–2012) v zájmovém povodí činil za měsíc květen 1,5 až 2°C. Přímým projevem nárůstu teploty ovlivňující vodní bilanci je růst evapotranspirace, který je v oblasti zájmového povodí podmíněn také dostatečnou dotací srážek. I přesto, že se zájmové povodí v rámci ČR řadí z pohledu množství srážek spíše mezi nadprůměrné, a dle dlouhodobého pozorování vykazují srážky v průběhu května a června v pramenné části rostoucí charakter (Obr. 3.20, a), poukazují výsledky studie Brázdila, Trnky et al. (2015) na negativní trend vodní bilance. Ten v pramenné oblasti zájmového povodí za posledních 50. let zaznamenal pokles až o 100 mm zapříčiněný právě růstem evapotranspirace nad srážkami (Obr. 3.20, b), což představuje riziko



Obr. 3.20: Statisticky významné trendy vybraných parametrů vodní bilance a hodnot půdní vláhly povodí Rožnovské Bečvy (označeno kroužkem) v období 1961–2012. a) srážky; b) rozdíl srážek a ETr; c) množství vody v půdním profilu 0–1,3 m

dostupné vody pro povrchový i podpovrchový odtok. Kde se však pokles vláhové bilance neodráží, je parametr půdní vláhý, který je v pramenné oblasti charakterizován až rostoucím trendem (Obr. 3.20, c). V níže položené polovině povodí však platí trend opačný.

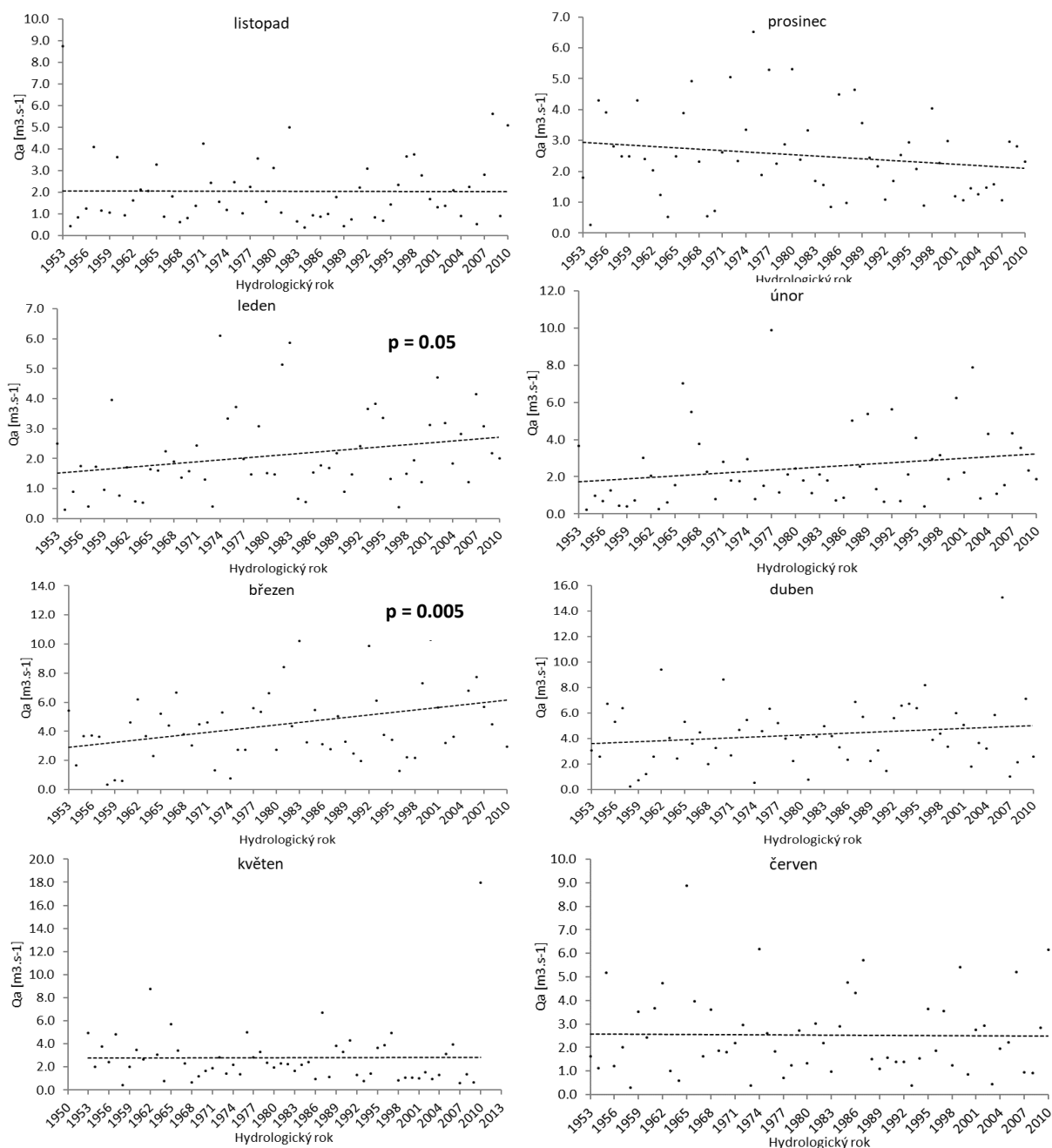
V rámci dlouhodobých predikcí vlivu klimatických změn na odtokový režim je předpovídán pokles celkového odtoku, který v zájmovém povodí může do roku 2099 dosáhnout až 20 % (BRÁZDIL, TRNKA et al., 2015). Jak je však patrné z Obr. 3.11 (kap. 3.2.1.) za období od roku 1952–2010 vykazují průměrné roční průtoky spíše rostoucí trend. Také z pohledu nedostatkových průtoků nebyl dle studie Brázdila, Trnky et al. (2015) na povodí Rožnovské Bečvy za období 1961–2007 pozorován žádný významný trend prohlubování nedostatkových objemů, ale naopak byl v povodí Bečvy zaznamenán jejich klesající trend, poukazující na zmírňování projevů sucha.



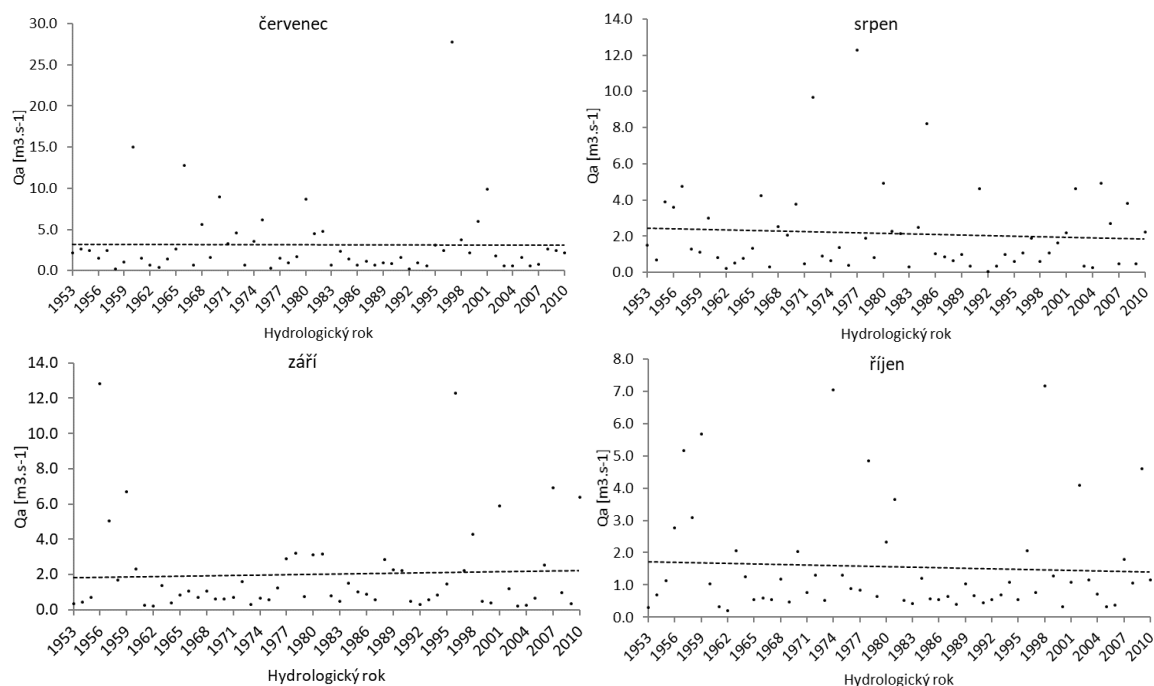
Obr. 3.21: Minimální roční průtoky (Q_{amin}) (nahore) a počet dnů s průtoky menšími než Q_{355} (dole) na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

Tato fakta potvrzují také výsledky testu trendu hodnot minimálních ročních průtoků (Q_{amin}) a počtu dnů s průtoky rovnými či menšími než minimální zůstatkový průtok ($Q_d < Q_{355}$) na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) provedeného pomocí lineární regrese z dostupných dat průměrných denních průtoků (Q_d) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b). I přesto, že se ani u jedné zkoumané proměnné nepotvrdil statisticky významný trend, disponují hodnoty Q_{amin} spíše rostoucím charakterem (Obr. 3.21, nahore), počet dnů s $Q_d < Q_{355}$ spíše klesajícím charakterem (Obr. 3.21, dole).

Nicméně tyto údaje nejsou v protikladu s trendy, které jsou předpovídaný v podmínkách budoucích změn klimatu, tedy zmenšování odtoku v létě v reakci na zvyšování teploty vzduchu a následně zvýšené evapotranspiraci, a jeho zvětšování během očekávaných teplejších zim, kdy bude větší část srážek vpadávat v podobě deště a ihned odtékat (BRÁZDIL, TRNKA et al., 2015).



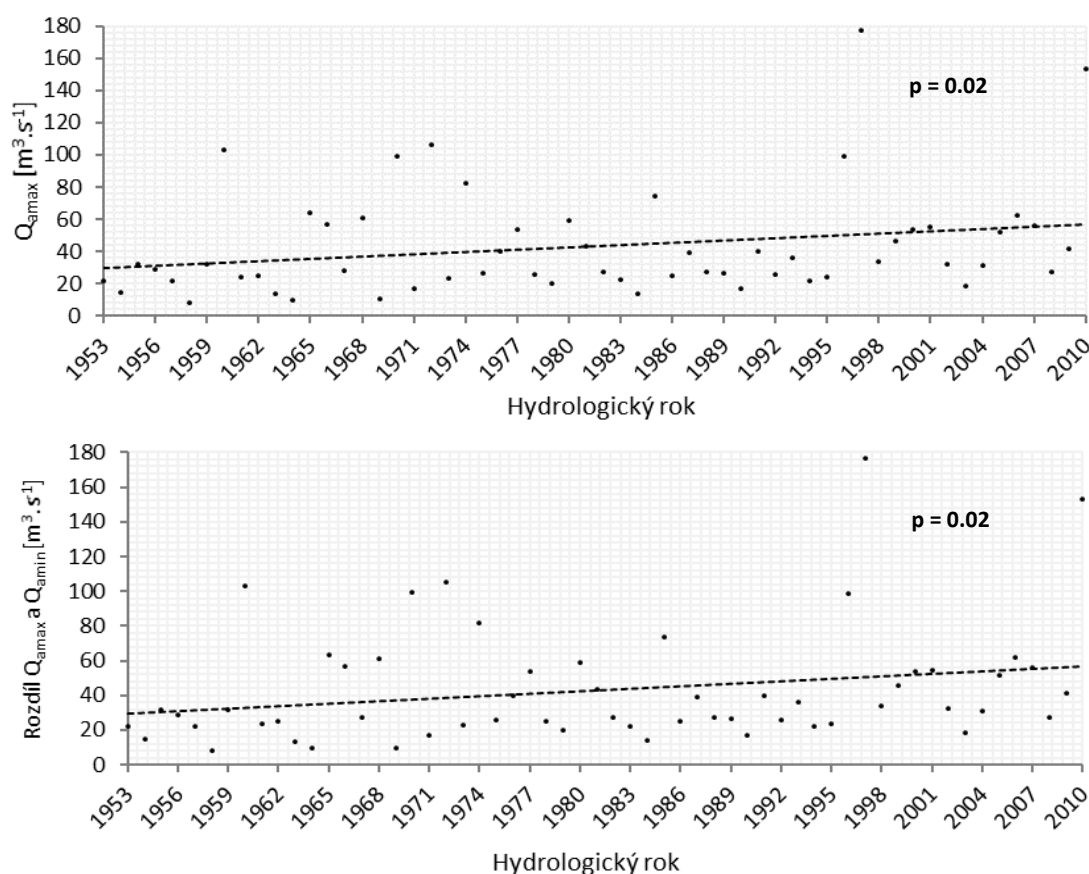
Obr. 3.22: Trendy průměrných ročních průtoků (Q_a) na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b). Statisticky významné trendy zobrazeny s p hodnotami.



Obr. 3.22: (pokračování) Trendy průměrných ročních průtoků (Q_a) na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b). Statisticky významné trendy zobrazeny s p hodnotami.

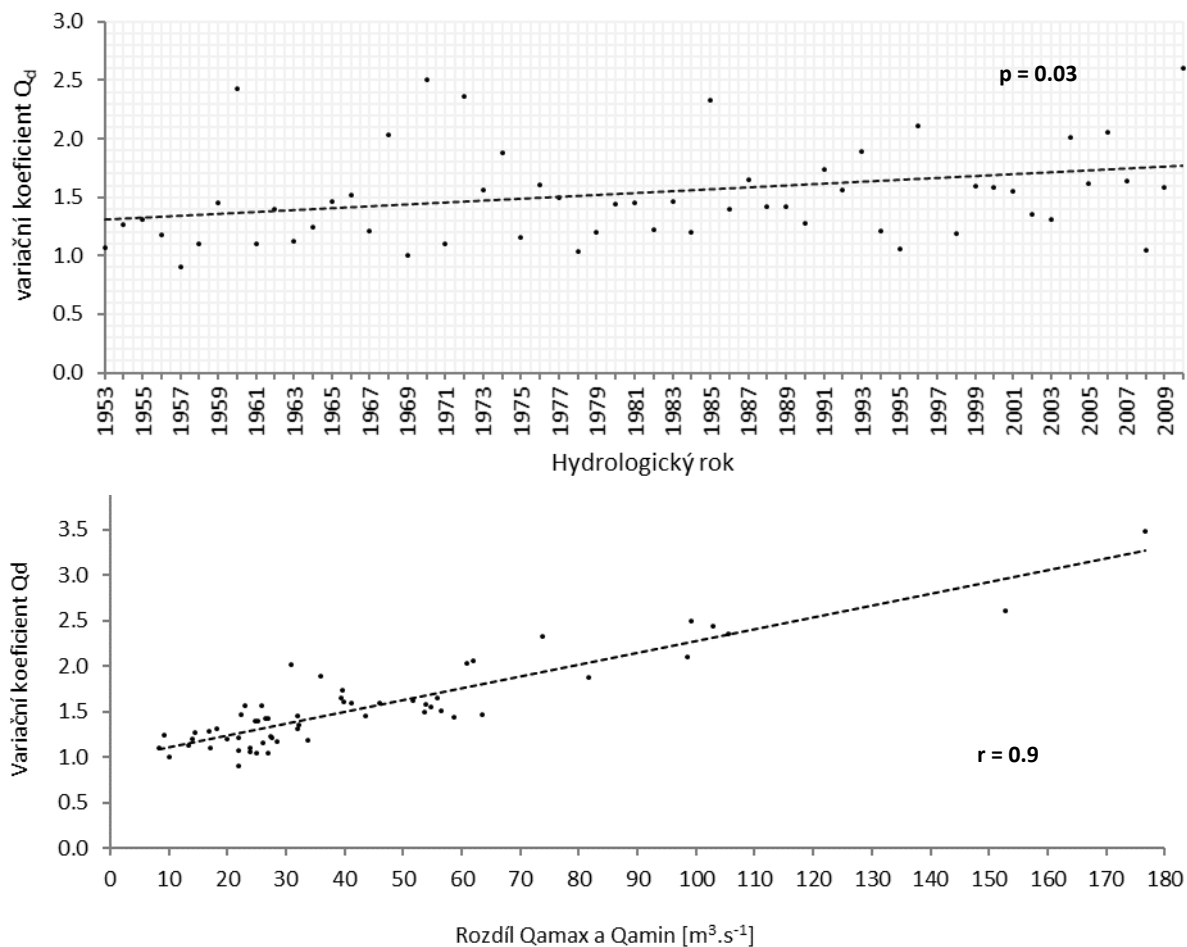
Tyto charakteristiky jsou také patrné z Obr. 3.22, který poukazuje na trendy odtoku jednotlivých měsíců za období od roku 1952–2010. Nárůst průtoků v období zimních měsíců počíná statisticky významným trendem ($\alpha = 0,05$) v měsíci lednu a pokračuje až do února, který již statisticky významný růst nevykazuje. Ten je zaznamenán až v měsíci březnu ($\alpha = 0,05$), kdy je možné se domnívat stále o vlivu postupné převahy kapalných srážek nad pevnými. Pokles průtoků počíná měsícem květnem až do konce prosince, kdy se však již žádný významný trend neprojevil.

Dalším předpokládaným dopadem klimatických změn je zvyšování extremity hydrologických událostí, které se projevují kromě nárůstu nedostatkových objemů, také zvyšováním extremity povodňových událostí (HUNTINGTON, 2006; HANEL et al., 2011; BRÁZDIL, TRNKA et al. 2015). Předpoklad růstu extremity hydrologických jevů byl na základě dostupných hodnot Q_d (1952–2010) testován pomocí lineární regrese čtyř proměnných: variačních koeficientů Q_d jednotlivých let, napovídající o vývoji variability Q_d za zkoumané období, minimálních a maximálních (Q_{amax}) ročních průtoků a jejich rozdílu, poukazující na vývoj extrémních hodnot průtoků. Následně byl předpoklad analyzován pomocí korelace rozdílu Q_{amax} a Q_{amin} a variačních koeficientů.



Obr. 3.23: Statisticky významné trendy ($\alpha = 0,05$) hodnot Q_{amax} (nahore) a rozdílů Q_{amax} a Q_{amin} (dole) s p hodnotami na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b).

Jak bylo zmíněno výše, vývoj trendů Q_{amin} či počtu dnů s $Q_d < Q_{355}$ nebyl potvrzen, ale naopak vykazuje opačné tendence. Výsledky testů trendu Q_{amax} spolu s trendem rozdílů mezi Q_{amax} a Q_{amin} již však prokazují statisticky významný růst ($\alpha = 0,05$) (Obr. 3.23), a tedy zvyšování hodnot průtoků povodňových událostí a rostoucích rozdílů mezi minimálními a maximálními průtoky.



Obr. 3.24: Statisticky významný trend ($\alpha = 0,05$) variability Q_d určená podle $C_v Q_d$ s p hodnotou (nahore) a korelace mezi $C_v Q_d$ a rozdílem Q_{amax} a Q_{amin} s korelačním koeficientem (r) (dole) na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b).

Další statisticky významný rostoucí trend ($\alpha = 0,05$) byl zaznamenán u hodnot variačních koeficientů Q_d . Po analýze korelace variačních koeficientů Q_d a rozdílu Q_{amax} a Q_{amin} může být potvrzena závislost růstu variability průtoků na rostoucím rozdílu Q_{amax} a Q_{amin} (Obr. 3.24) a předpokládán růst extrémních hydrologických jevů.

3.5.2. Výsledky návrhů opatření plánů Povodí Moravy, Studie Zlínského kraje a územních plánů obcí týkající se problematiky retence vody v říční nivě

Návrhy opatření Povodí Moravy IIPO

Návrhy opatření Povodí Moravy pro druhé plánovací období (dále jen IIPO) jsou převážně menšího a techničtějšího rázu jako je zkapacitnění koryt toků nebo jejich zpevnění. Rozsáhlejší studií navrhující přírodě blízká protipovodňová opatření (dále jen PBPO) je koncepce „Návrh strukturálního řešení protierozních a protipovodňových opatření v povodí Bečvy“ (dále jen „Bečva“) vytvořená autorským kolektivem v čele s firmou EKOTOXA s.r.o., ŠINDLAR s.r.o., a VUT v Brně v září 2007 (ROMÁNKOVÁ, 2010). Hlavním cílem koncepce byl návrh komplexních protipovodňových a protierozních opatření v ploše celého povodí řeky Bečvy, revitalizačních opatření, která by měla vést k dalšímu přirozenému vývoji úseků vzniklých po povodni 1997, migrační prostupnosti příčných staveb a obnově retence údolní nivy. Nejvýraznější opatření v celém povodí řeky Bečvy představuje poldr Teplice plánovaný na cca 47 ř. km řeky Bečvy s retenčním objemem při max. hladině 38 mil. m³. Proti realizaci stavby však existuje řada argumentů, od negativních vlivů na morfologii toku, povodňový a splaveninový režim (ČERMÁK, 2010) po nedostatečné naplnění protipovodňové funkce a nutnosti dalších opatření v jiných částech povodí Bečvy (ROMÁŠEK, 2007). Návrh tohoto opatření je zachován také ve IIPO, došlo však ke změně konceptu a „poldr Teplice“ byl změněn na nádrž VD Skalička. Vzhledem k řadě negativních reakcí k plánované stavbě by v současné době mělo být zpracováno celkem pět studií, zahrnující také návrhy ekologických hnutí, ze kterých bude vybrána ta nejlépe vyhovující všem stranám (PMO, 2017). Pro povodí Rožnovské Bečvy plyne ze studie několik doporučení od biotechnických opatření až po PBPO. Opatření byla navržena na základě výsledků hodnocení hydromorfologického stavu toku, který byl v povodí vyhodnocen jako poškozený. Typy opatření jsou popsány na Obr. 3.25.

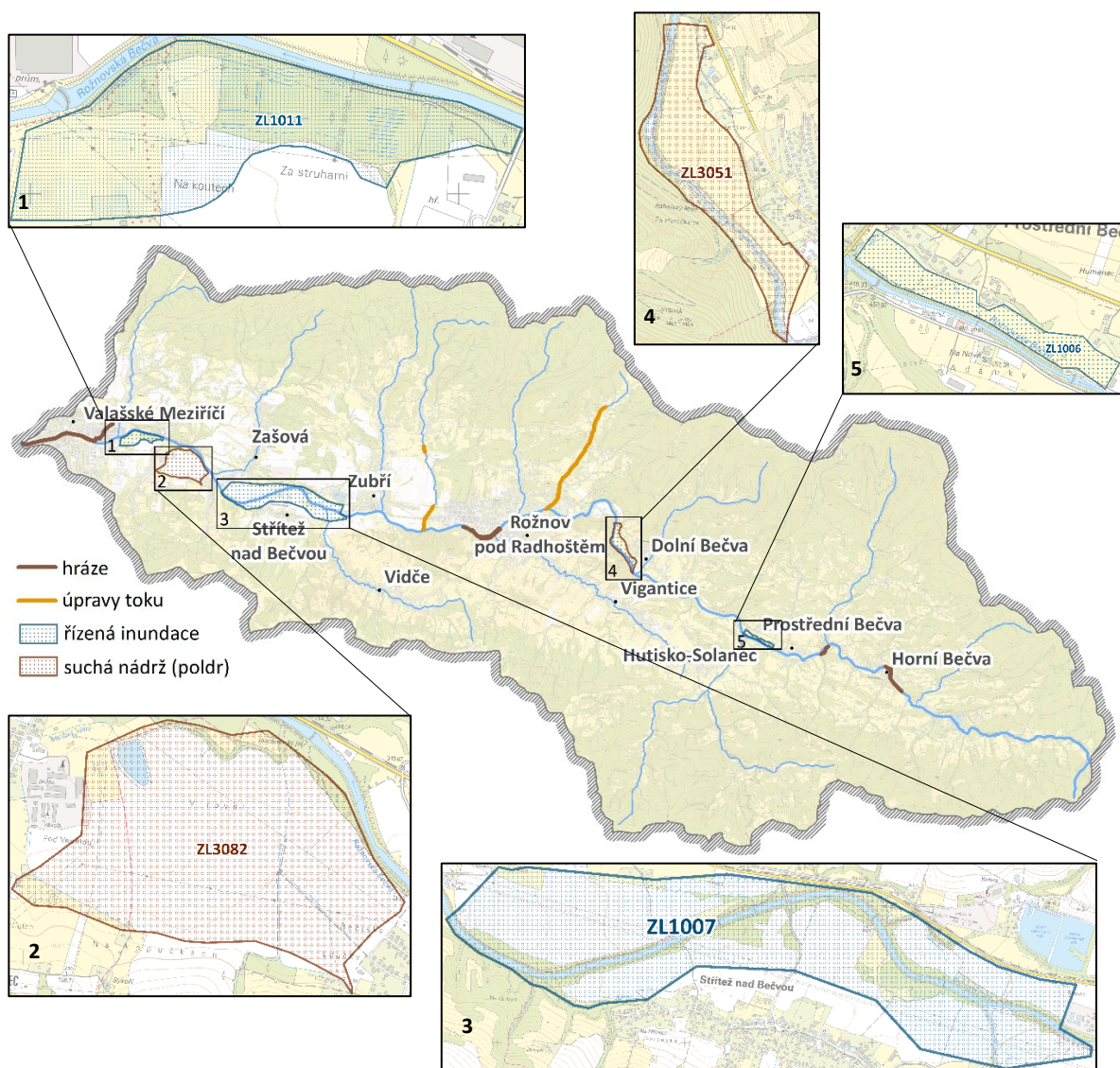


Obr. 3.25: Návrhy PBPO na toku Rožnovské Bečvy v rámci projektu „Bečva“. Charakteristiky typů opatření jsou: typ 1 - snížení kapacity koryta na korytotvorný průtok, rekonstrukce iniciálního tvaru a trasy koryta, obnov přirozené nivní vegetace včetně struktury říční nivy; typ 2 – zvýšení kapacity koryta složeným profilem pro protipovodňovou ochranu, iniciální trasa koryta, stabilizace pat svahů; typ 6 – jako typ 1 spolu s ohrázdováním v zastavěných územích. (převzato z: ROMÁNKOVÁ, 2010)

Další návrhy opatření přináší „Studie proveditelnosti k realizaci PBPO v Mirkoregionu Rožnovsko“. Studie doplňuje projekt „Bečva“ a zaměřuje se na opatření přítoků Rožnovské Bečvy. Navrhovaná opatření se kromě těch biotechnického charakteru (protierozní meze, průlehy, hrázky) vztahují na úpravy koryt a niv, tj. opatření podporující přirozený tlumivý rozliv povodní v nivách a dále na výstavby poldrů či jejich soustav s revitalizovanými toky a nivami v oblasti zátopy. Tento návrh je zatím v projektové fázi.

Návrhy opatření z aktualizované Studie PPO pro území Zlínského kraje z roku 2012–2013 pro IIPO

Řada opatření v aktualizované Studii ochrany před povodněmi na území Zlínského kraje z roku 2013 (dále jen „Studie“) byla podkladem pro návrhy opatření plánů povodí v obou plánovacích obdobích.

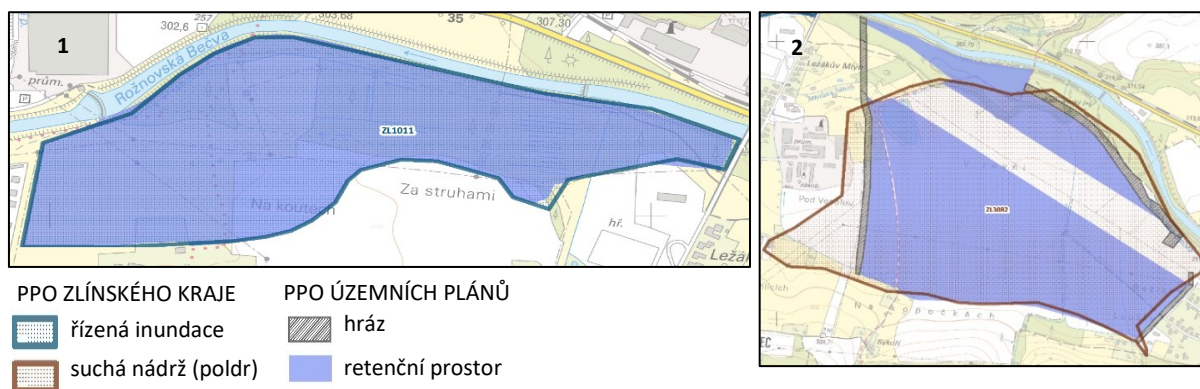


Obr. 3.26: Návrhy PPO opatření v povodí Rožnovské Bečvy podle aktualizované Studie PPO na území Zlínského kraje z roku 2012–2013. Prostory pro řízenou inundaci modře, prostory pro stavbu suchých nádrží hnědě.
(Upraveno dle HYDROPROJEKT CZ, 2013)

Opatření navržená v povodí Rožnovské Bečvy jsou převážně v podobě technických opatření toků či výstavby hrází pro ochranu intravilánu měst. Jsou zde ale také přítomna opatření podporující retenci vody v říčních nivách v podobě řízené inundace a staveb suchých nádrží. Právě pro poslední dva typy opatření, které se blíže dotýkají problematiky retence vody v krajině, bylo „Studii“ vybráno v povodí Rožnovské Bečvy pět lokalit (Obr. 3.26). Jako protipovodňová opatření (dál jen PPO) města Valašské Meziříčí je zamýšlena kombinace retenčních území s řízenou inundací Hrachovec (1), Střítež – Zašová (3) a suchou nádrží Hrachovec (2) s celkovým retenčním objemem 3,3 mil. m³. Zbylé retenční prostory složené z řízené inundace v obci Prostřední Bečva (5) a suché nádrže v obci Dolní Bečva (4) jsou vybrány jako součást PPO města Rožnov pod Radhoštěm s kapacitami území 3,2 mil. m³.

Aplikace návrhů opatření v územních plánech obcí v povodí Rožnovské Bečvy

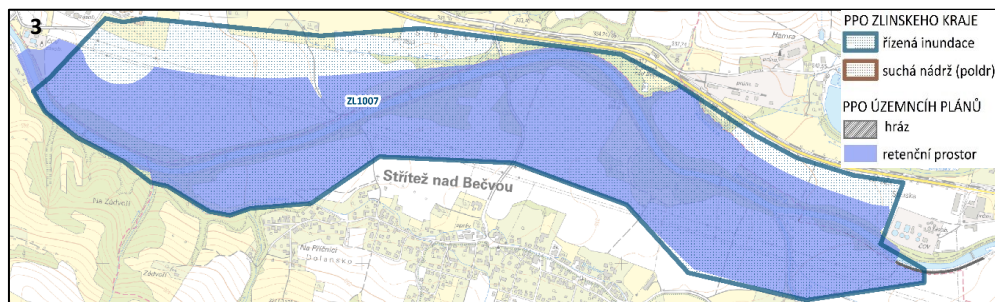
Po konfrontování návrhů retenčních opatření v říční nivě uvedených v aktualizované „Studii“ s aktuálními územními plány dotčených obcí (z let 2013–2017) bylo zjištěno, že veškerá navrhovaná retenční opatření byla převzata do územních plánů s téměř naprostou shodou.



Obr. 3.27: Návrh retenčních opatření v říční nivě Rožnovské Bečvy Studii PPO na území Zlínského kraje a plánovaných opatření v ÚP města Valašské Meziříčí a obce Zašová.

(Upraveno dle HYDROPROJEKT CZ (2013) a ÚP dotčených obcí)

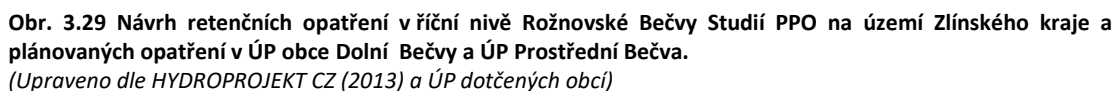
Město Valašské Meziříčí ve svém územním plánu z roku 2016 nese v souladu se záměry zásad územního rozvoje Zlínského kraje PPO v podobě retenčního prostoru (Obr. 3.27, 1). Dále se spolu s obcí Zašová podílí na plánování suché nádrže Hrachovec (Obr. 3.27, 2) vymezením ploch



Obr. 3.28: Návrh retenčních opatření v říční nivě Rožnovské Bečvy Studii PPO na území Zlínského kraje a plánovaných opatření v ÚP obce Zašová, Střítež nad Bečvou a města Zubří.

(Upraveno dle HYDROPROJEKT CZ (2013) a ÚP dotčených obcí)

Posledním retenčním prostorem v územních plánech obce Zašová je inundační prostor, který zasahuje také na území obce Střítež nad Bečvou a Zubří (Obr. 3.28). Celá oblast řízené inundace Střítež – Zašová je součástí neurbanizovaného území



59

4. Aplikované metody a zdroje dat

Následující kapitola obsahuje aplikované metody a použitá data, které byly zvoleny při výběru zájmového území, návrhu revitalizačních úprav v zájmovém území a samotném modelování ve 2D hydraulickém modelu HEC-RAS. Použitá data pro jednotlivé kroky a jejich zdroje jsou uvedeny v Tab. 4.1. Tabulka 4.1 také dále udává data použitá pro charakteristiku odtokových poměrů Rožnovské Bečvy a jejich trendů popsaných v kap. 3.2.1..

Tab. 4.1: Zdroje podkladů a dat sloužící pro výběr zájmového území, návrh profilů revitalizovaného náhonu a 2D hydraulický model

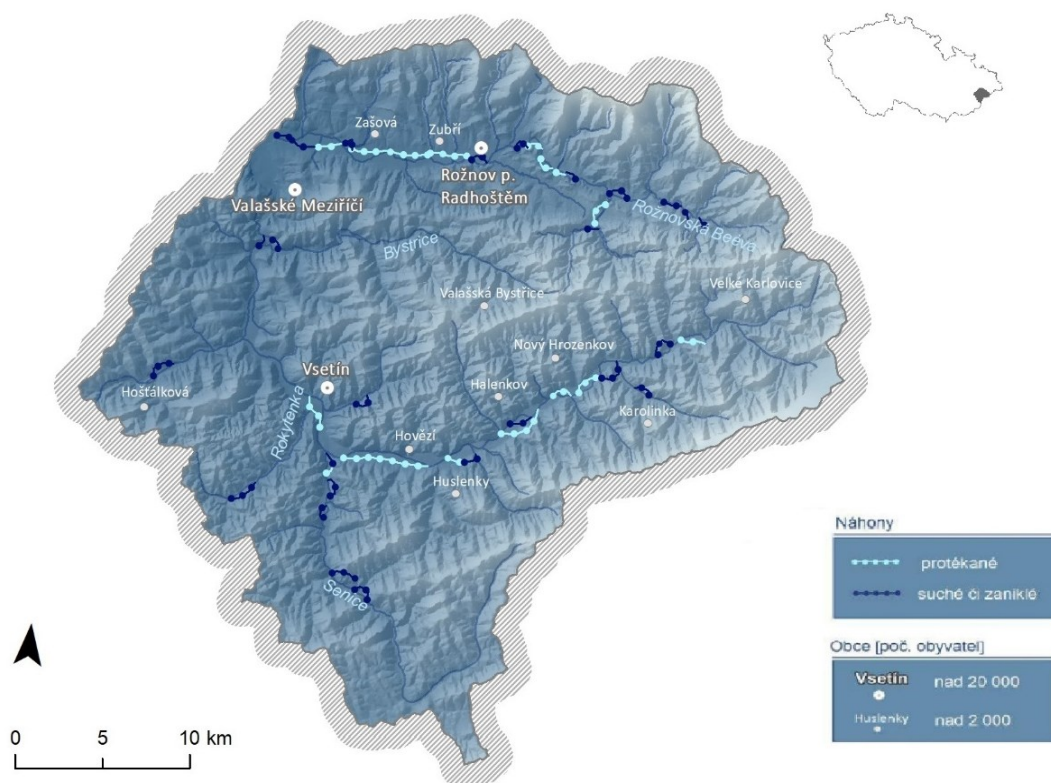
Výběr zájmového území		Návrh revitalizačních opatření		2D hydraulický model		Odtoková charakteristika	
Typ dat	Zdroj dat	Typ dat	Zdroj dat	Typ dat	Zdroj dat	Typ dat	Zdroj dat
výstupy bakalářské práce autorky	ZELÍKOVÁ (2014)	mapy III. vojenského mapování	Geoportál INSPIRE (2019b)	DMR 5G	ČÚZK (2017)	Q_d 1952–2010	ČHMÚ (2017b)
terénní průzkum	-	terénní zaměrování	-	Q_h povodně 1997	ČHMÚ (2018)	-	-
PPO studie Zlínského kraje	HYDROPROJEKT CZ (2013)	DIBAVOD	VÚV TGM (2018)	Q_h povodně 2007	ČHMÚ (2018)	-	-
PDP Moravy a přítoků Váhu	PDP (2015)	-	-	DIBAVOD	VÚV TGM (2018)	-	-
Studie proveditelnosti	Koalice pro řeky z.s. (2015)	-	-	drsnostní koeficient terénní zaměření profilů náhonu	BRUNNER (2016b)	-	-
		-	-		-	-	-

Hlavními zdroji dat pro výběr modelovaného území byly výstupy bakalářské práce autorky doplněné terénním průzkumem a vodohospodářskými plánovacími dokumenty Zlínského kraje, Povodí Moravy s. p., a Studií proveditelnosti neziskové organizace Koalice pro řeky z. s. K vizualizaci a pozdější manipulaci vektorizovaných dat návrhů revitalizačních úprav v zájmovém úseku mezi programy HEC–RAS a ArcMap sloužily především mapy III. vojenského mapování získané ve formě WMS z Národního geoportálu INSPIRE (2019) a hydrografická data z databáze DIBAVOD (VÚV, 2018). K popisu povrchu v hydraulickém modelu sloužil digitální model reliéfu 5G (DMR 5G) poskytnutý ČÚZK (ČÚZK, 2017), k jehož manuální úpravě byly využity údaje z terénního zaměrování koryta vodního náhonu v modelovaném úseku. Posledním prvkem sloužícím k popisu povrchu byly drsnostní koeficienty povrchu uvedené v manuálu programu HEC–RAS (BRUNNER, 2016b). Ke zhodnocení transformačního účinku navržených opatření byly od ČHMÚ (2018) získány průměrné hodinové průtoky (Q_h) povodňových událostí o nižší a vyšší N-letosti. Jedná se o povodňové události z roku 2007 (Q_5) a 1997 (Q_{100}) ze stanice Rožnov pod Radhoštěm lokalizované na 14,300 ř. km Rožnovské Bečvy (ID 386000) (5. 7. 1997 – 11. 7. 1997 a 5. 9. 2007 – 15. 9. 2007) a ze stanice Valašské Meziříčí (ID 387000) lokalizované na 1,400 ř. km Rožnovské Bečvy (4. 7. 1997 – 16. 7. 1997 a 1. 9. 2007 – 15. 9. 2007). Charakteristika odtokových poměrů zájmového povodí a jejich trendů byla vypracována na základě 50. leté datové sady průměrných denních průtoků za období 1952–2010 získané ze stanice Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) (ČHMÚ, 2017b).

4.1. Výběr modelovaného úseku a návrhy revitalizačních úprav

4.1.1. Výběr zájmového území

Lokalizace zájmového území vycházela přednostně z dílčích výsledků bakalářské práce autorky (ZELÍKOVÁ, 2014), kterými byla inventarizace vodních náhonů v povodí řek Vsetínské a Rožnovské Bečvy. Ty představovaly základní podnět pro položení výzkumné otázky diplomové práce, zdali existuje potenciál v revitalizaci území s vodními náhony jako nástroje pro zvýšení retence vody v říční nivě. Samotná inventarizace proběhla srovnáním historických mapových podkladů (mapy II. a III. vojenského mapování) s archivními materiály; zde vodními knihami a jejich rejstříky obsahujícími seznamy hydrotechnických staveb a jejich vlastníků v jednotlivých obcích. Tyto dokumenty byly poskytnuty Státním okresním archivem Vsetín. Pro upřesnění lokalizace a trasování vodních náhonů byly získané informace doplněny terénním průzkumem spojeným s dotazováním obyvatel v daných lokalitách.



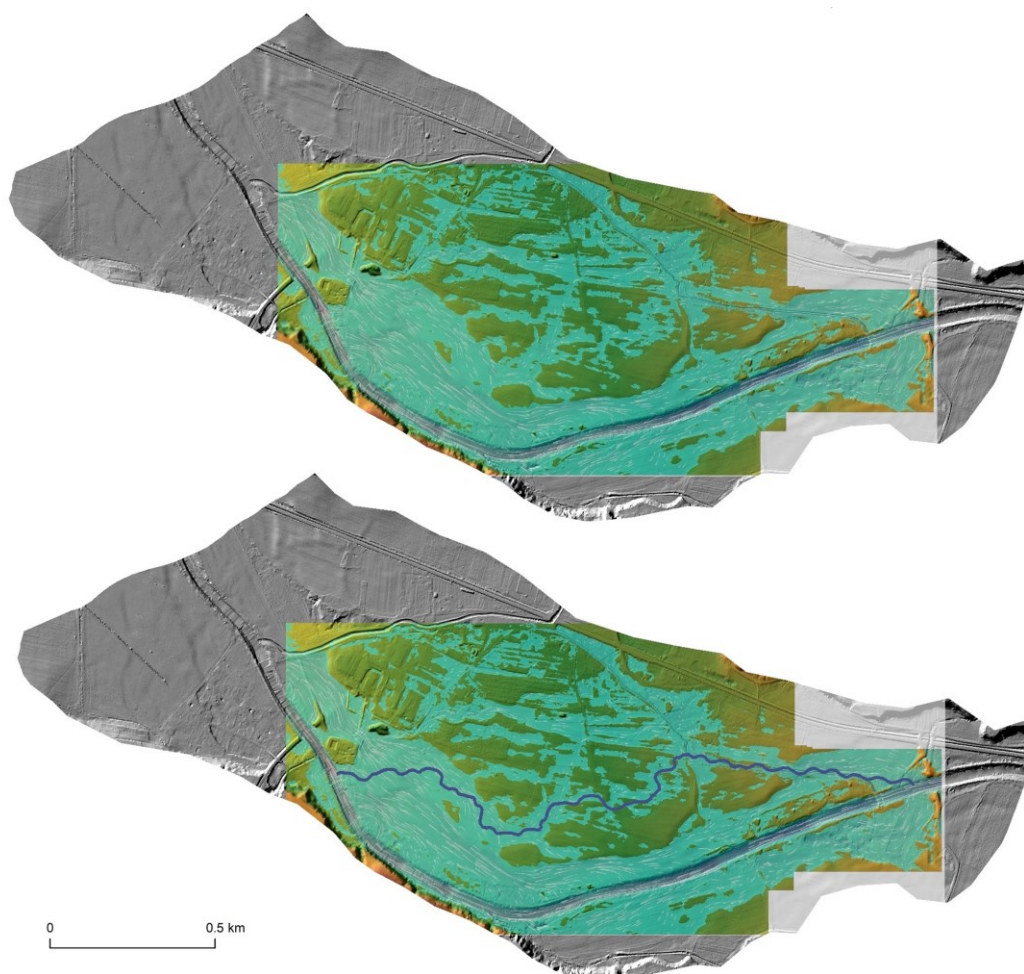
Obr. 4.1: Dílčí výstupy bakalářské práce autory obsahující inventarizaci vodních náhonů (protékané, zaniklé) v zájmovém povodí Rožnovské a Vsetínské Bečvy

Pro účely diplomové práce byly z výsledků inventarizace vybrány náhony o celkové délce 27 km (Obr. 4.1), které jsou stále protékané (14) a disponují potenciálem k revitalizaci, tj. dostupným prostorem a charakterem využití území. Tyto lokality byly pro zjištění relevantnosti záměru diplomové práce následně konfrontovány s návrhy opatření uvedenými ve vodohospodářských plánech (Plán dílčího povodí Moravy a přítoků Váhu, 2015), v protipovodňových plánech Zlínského kraje uveřejněných ve Studii na ochranu před povodněmi na území Zlínského kraje (aktualizace k roku 2013) a ve Studii proveditelnosti revitalizace Bečvy Vsetínské od ř. km 82,500 až k pramenným úsekům, zadané spolkem Koalice pro řeky, z. s. (z roku 2015). Popis modelovaného území viz kap. 5.1.1.

4.1.2. Návrh revitalizačních úprav

Návrh trasy a příčného profilu koryta

Návrh trasy koryta, jeho vinutí a příčného profilu byl proveden na základě konfrontace historických podkladů map III. vojenského mapování, pomocných výsledků simulace modelu HEC-RAS a závěrů konzultace se školitelkou diplomové práce.



Obr. 4.2: Využití výsledků pomocné simulace v programu HEC-RAS pro určení revitalizačního návrhu trasy náhonu (nahore). Revitalizační návrh vedení trasy náhonu na podkladu výsledků pomocné simulace (dole)

Pro návrh trasy nového koryta sloužily výsledky simulace z programu HEC-RAS. Simulace proběhla za využití kulminačního průtoku na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) povodně z roku 1997 ($Q=267 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), za původní situace terénu a optimálních drsnostních podmínek. V prohlížeči RasMapper byl využit nástroj *Particle Tracing* nabízející animovanou vizualizaci proudění, která poukázala na preferenční trasy proudění v nivě při vybřežení vody z náhonu. Výsledky simulace byly vygenerovány v grafické podobě v rozhraní prohlížeče RasMapper a překryty s reliéfem modelovaného území v programu ArcMap pomocí nástrojů georeferencování (Obr. 4.2). Detailnější zobrazení výsledků pomocné simulace je k nahlédnutí v Příloze č. 1.3. a 1.4..

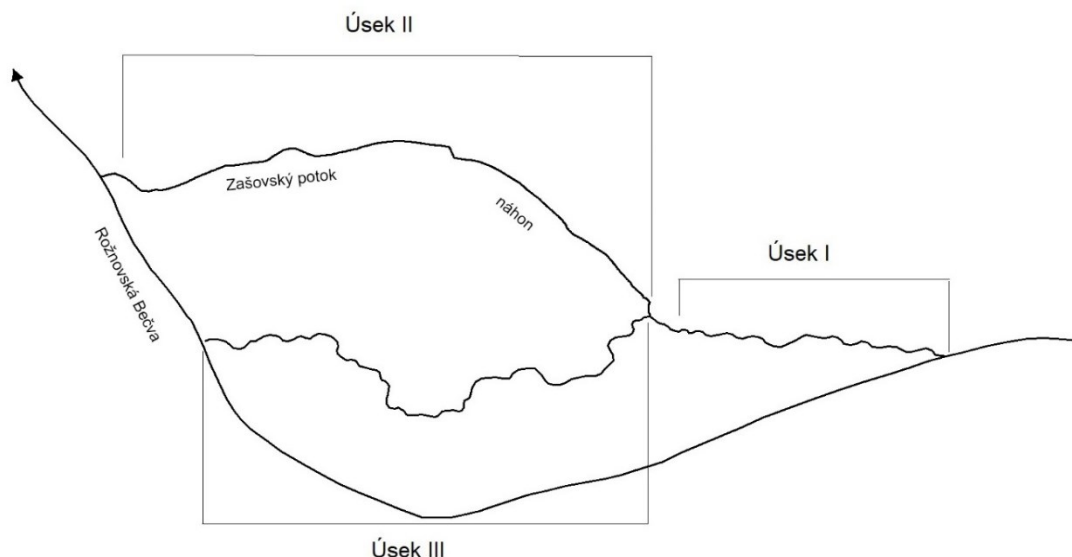
Charakter vinutí toku vycházel převážně z podkladů III. vojenského mapování. Protože finální návrh trasy nesleduje celou linii původního náhonu, ale odbočuje na jeho 0,603 ř. km, byla pro návrh vinutí trasy využita jen počáteční část (Obr. 4.3, b). Vinutí ve zbylé trase revitalizovaného koryta se odvíjelo od charakteru vinutí v počátečním úseku i vinutí jiných toků v povodí o stejné velikosti a stejných sklonitostních podmínkách (Obr. 4.3, a).



Obr. 4.3: Podklady III. vojenského mapování pro návrh vinutí nového koryta. (a) Charakter vinutí toku podobné velikosti jako zkoumaný náhon (b) počáteční úsek zájmového náhonu (c) Návrh vinutí trasy nového koryta sledující trasu původního náhonu na jeho počátku

Vzhledem k současné situaci osídlení vybraného modelovaného území (viz. kap. 5.1.1.) podél druhé poloviny trasy původního náhonu a využívání této části náhonu místními obyvateli bylo rozhodnuto o jeho zachování při návrhu revitalizačních úprav. Respektováním těchto uvedených podmínek vznikly tři úseky návrhu revitalizační situace (Obr. 4.4). Úsek I představuje revitalizovanou část počátku náhonu vedoucí z Rožnovské Bečvy na jejím 8,429 ř. km. Po téměř 800 m dochází k větvení Úseku I mezi Úsekem II a III. Úsek II je původním korytem náhonu beze

změny ústícím do toku Zašovského potoka (0,883 ř. km), který ústí do Rožnovské Bečvy na jejím 5,590 ř. km. Úsek III je návrh zcela nového přírodě blízkého koryta, ústící do Rožnovské Bečvy na 6,384 ř. km. Přestože se část Zašovského potoka s ústím do Rožnovské Bečvy nachází v modelovaném úseku, bylo by vhodné jej uvést coby další okrajovou podmínku, avšak vzhledem k absenci údajů o průtocích byl přítok zanedbán a koryto v modelu sloužilo pouze jako „prodloužení“ náhonu.



Obr. 4.4: Schéma situace s revitalizačními návrhy pro Úsek I a Úsek III a zachovaným korytem původního náhonu (Úsek II) vbráného modelovaného území

Z důvodu ponechání původního koryta náhonu (Úsek II) bylo nutné uvažovat o zajištění dostatečného přítoku do obou větví náhonu (Úsek II, Úsek III). Tento předpoklad se tak promítnul do návrhu průtočné kapacity Úseku I, jehož hodnota byla určena přibližně jako dvojnásobek průtočné kapacity původního koryta v tomto úseku. Návrh průtočné kapacity nově vytvořeného koryta (Úsek III) se řídil cílem zachování podobné průtočné kapacity jako v Úseku II s tím rozdílem, že došlo ke snížení hloubky koryta a jeho rozšíření.

Za těchto podmínek tak bylo přistoupeno k výpočtu navrhovaných rozměrů revitalizovaných koryt v Úseku I a III. Prvním krokem bylo určení průtočných kapacit původního Úseku I a II, které sloužily jako referenční hodnoty pro návrhy rozměrů revitalizovaných koryt. Pro výpočet průtočné kapacity původních Úseků I a II a následně nově navržených Úseků I a III bylo využito Chézyho rovnice:

$$Q = C * S * \sqrt{R * I} \quad (4.1)$$

kde:

Q - průtok ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

C – rychlostní součinitel ($\text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$)

S – plocha průtočného profilu (m^2)

R – hydraulický poloměr (m)

I – sklon dna

Hydraulický poloměr

$$R = \frac{S}{o} \quad (4.2)$$

Rychlostní součinitel podle Manninga

$$C = \frac{1}{n} * R^{\frac{1}{6}} \quad (4.3)$$

kde n – drsnostní součinitel podle Manninga

Jednotlivé parametry pro výpočet průtočné kapacity původních Úseků I a II byly určeny jako průměrné hodnoty z příčných profilů měřených každých 50 m podél obou úseků. Hodnoty drsnostního koeficientu pro koryta byly odhadnuty z terénního průzkumu za využití tabulky drsností publikované v uživatelském manuálu k programu HEC-RAS (BRUNNER, 2016b). Stejně hodnoty drsností byly použity i během hydraulického modelování.

Výpočet průtočné kapacity nově navrhovaných koryt vycházel opět z Chézyho rovnice. Pro výpočet průtočné plochy vstupující do Chézyho rovnice byl využit vzorec pro výpočet plochy lichoběžníku, s podmínkou zachování poměru šířky koryta ke hloubce v hodnotách vyhovujících podmínkám přírodních toků, tedy 4:1 až 10:1 (JUST, 2005). V tomto vztahu byly v rámci požadavků upravovány hodnoty šířky a hloubky profilu nového návrhu Úseku I tak, až bylo dosaženo přibližně dvojnásobné hodnoty průtočné kapacity původního Úseku I. Pro Úsek III byly hodnoty voleny tak, aby se co nejvíce shodovaly s průtočnou kapacitou Úseku II.

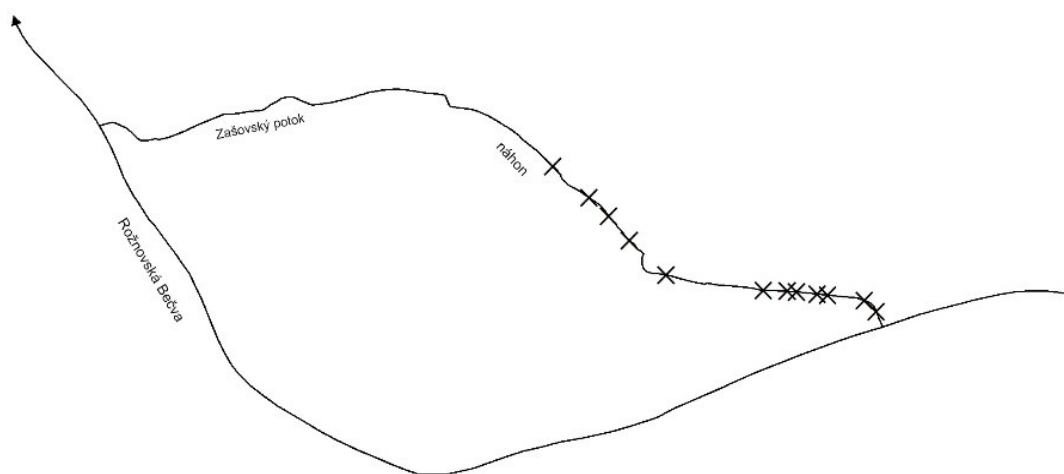
Návrh změn využití povrchu

Součástí návrhu revitalizačních úprav byl návrh změn současného stavu využití povrchu. Pro tento účel byly vytvořeny tři varianty revitalizačních úprav využití přilehlého území Úseku I a III, napodobující postupný vývoj vegetace od počátku provedení revitalizačních úprav, tj bez jakýchkoliv změn a po situaci se vzrostlým lesem pokrývajícím značnou část přilehlého území. Typy povrchů s sebou nesly také hodnoty drsnostního koeficientu, které jsou jednou ze vstupních hodnot výpočtů hydraulického modelu. Tyto hodnoty byly odvozeny z tabulky drsností publikované v uživatelském manuálu k programu HEC-RAS (BRUNNER, 2016b). Pro vybrané typy povrchu vstupující do simulace jsou hodnoty drsnostního koeficientu uvedeny v Tab. 4.2.

4.2. Modelování vlivu revitalizačních úprav na zvýšení retence vody v říční nivě

4.2.1. Geometrie modelu

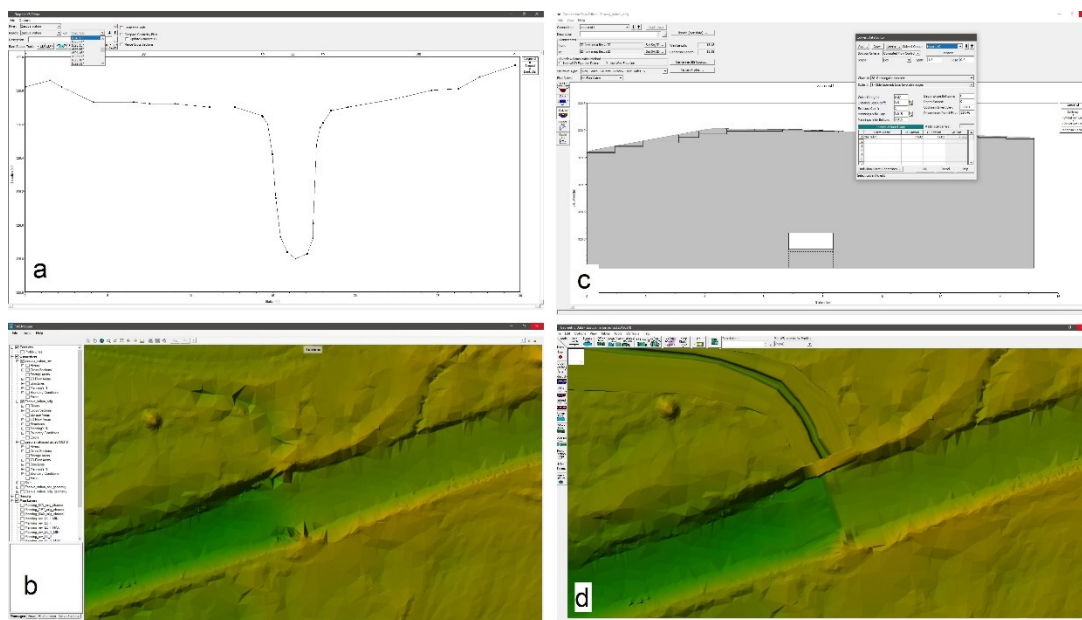
Pro demonstraci efektu revitalizačních úprav v modelovaném území na změnu retence vody v říční nivě byl využit 2D hydraulický model HEC-RAS 5.0.5. Příprava referenčního modelu, vzhledem ke kterému byly prováděny simulace revitalizačních úprav, i modelu pro simulaci revitalizačních úprav, se před samotným výpočtem skládala ze tří hlavních kroků: vytvoření geometrie zájmového území, zadání vstupních údajů a samotné simulace neustáleného proudění. Hlavním podkladem pro znázornění geometrie modelovaného území byl digitální model reliéfu 5G (DMR 5G) zakoupený od ČÚZK s úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu.



Obr. 4.5: Lokalizace měřených profilů (křížky) pro úpravu DMR (nahore). Terénní měření příčných profilů na Hrachoveckém náhonu (nezařazen do modelovacího procesu) (dole).
(foto: archiv autorky, březen 2018)

I přes detailnost DMR však byla horní polovina vodního náhonu vykreslena chybně a v některých úsecích koryto zcela splývalo s okolním terénem. Tento fakt je příkládán vlivu okolní vegetace, která doprovází náhon téměř po celé jeho délce. Z těchto důvodů bylo nutné přikročit k manuální úpravě DMR. Pro tento účel bylo v terénu zaměřeno několik příčných profilů koryta náhonu pro dosažení dostatečně přesného vykreslení jeho morfologie (Obr. 4.5).

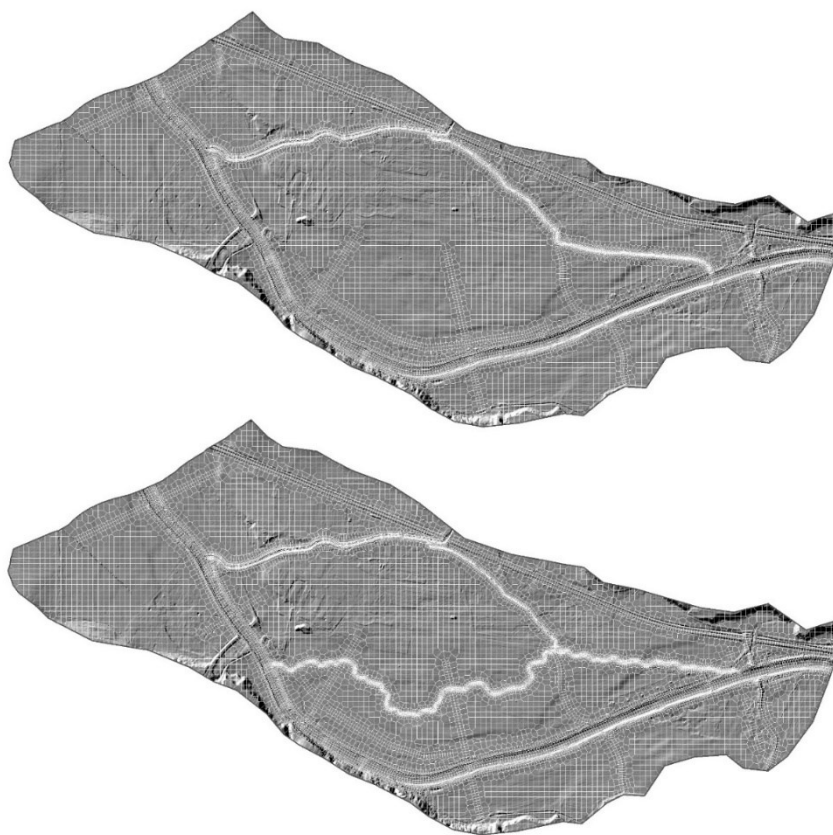
V softwaru ArcMap s rozšířením HEC-GeoRas sloužícím k exportu dat do programu HEC-RAS, bylo nutné pro data určená k exportu nejdříve připravit platformu, kde byla na podkladu DMR narýsována vektorová vrstva příčných profilů místně se shodující s jejich měřenými lokalitami v terénu. Po exportu bylo možné v programu HEC-RAS v geometrickém editoru nastavit souřadnice nadmořských výšek bodům příčných profilů naměřených v terénu. Tyto profily byly poté pro pokrytí celé délky náhonu mezi sebou interpolovány pomocí nástroje *XS interpolation* s krokem 0,5 m.



Obr. 4.6: Ukázka prostředí grafického editoru softwaru HEC-RAS pro správu geometrie. Úprava příčného profilu pomocí souřadnicových bodů (a). DMR s náhonem, stavidlem a jezem před (b) a po úpravě (d). Grafické rozhraní pro vložení otvoru stavidla (c)

Vytvoření nového terénu proběhlo v prohlížeči RAS Mapper. Zde byly prostory mezi profily interpolovány ve formě rastru, a to jejich exportem ve formátu GeoTiff s velikostí buňky rastru 0,18 m. Prostory mezi profily tak vytvořily souvislý nový terén, který byl následně spojen s původním terénem za použití nástroje *Create a New RAS Terrain* ve formátu TIF s volbou upřednostňující nový terén nad původním. Vedle samotného koryta náhonu bylo pro přesnost výpočtu nutné upravit obdobným způsobem popsáním výše také terén v oblasti vtoku a výtoku z náhonu. V prvním případě se jednalo o říční jez v korytě Rožnovské Bečvy, jehož původní profil výškově neodpovídal jezu reálnému. Dále byla upravena geometrie stavidla na vtoku do náhonu, které v DMR nebylo průtočné a představovalo tak jen podobu „hráze“. Propustek skrz „hráz“ byl zadán ve formě souřadnic nadmořských výšek a rozměrů vypořizovaných v terénu (1,5 x 0,3 m) v prostředí geometrického editoru pomocí nástroje

SA/2D Area Connection jako betonový propustek (Obr. 4.6). Obdobně probíhalo navržení propustku také v ústí náhonu do Zašovského potoka s rozměry betonového propustku o poloměru 0,8 m.



Obr. 4.7: Ilustrace výpočetní sítě v modelovaném území sloužící k provedení 2D hydraulické simulace v programu HEC-RAS. Výpočetní síť původní verze terénu (nahore). Výpočetní síť s revitalizačními úpravami terénu (dole)

Obdobným způsobem jako byla provedena korektura původního terénu, proběhla jeho úprava během tvorby nových koryt Úseků I a III. V softwarovém rozhraní GeoRAS byla vytvořena série příčných profilů charakterizující vinutí toku. Jejich souřadnicové body byly v grafickém editoru softwaru HEC-RAS upraveny tak, aby co nejvíce napodobovaly tvar příčných profilů typických u přírodě blízkých koryt. Interpolace mezi navrženými příčnými profily byla vytvořena s krokem 0,5 m.

Po manuálních úpravách terénu přišlo na řadu vytvoření výpočetní 2D sítě (prostoru, kde probíhá vlastní výpočet modelu) (Obr. 4.7). Síť byla ručně navržena pomocí nástroje *2D Flow Area* a vedena převážně po okrajích říční nivy zájmového území s výslednou plochou 2,5 km². Velikost buněk výpočetní sítě byla zvolena ve velikosti 20 x 20 m. Pro zpřesnění výpočtu v oblasti koryt i v oblasti zátopy bylo přistoupeno ke zjemnění výpočetní sítě editací vrstvy *Break lines*, v níž byly navrženy linie kopírující proudnice toků, jejich podélné hráze a podobné terénní překážky ovlivňující rozsah záplavového území (náspy a hráze). U těchto liniových prvků dosahovala velikost buněk rozměrů od 1 do 10 m. Celkem tak výpočetní síť obsahovala 21308 výpočetních buněk. Obdobným způsobem byl vytvořen upravený terén pro simulaci revitalizované situace,

kde výpočetní síť obsahovala 23886 buněk (Obr. 4.7). Detailnější zobrazení výpočetních sítí viz Příloha č. 1.1 a 1.2..

Tab. 4.2: Hodnoty drsnostního koeficientu povrchu použité pro vybrané typy povrchu vstupující do hydraulického modelu (BRUNNER, 2016b)

typ povrchu	původní stav			revitalizovaný stav		
	minimální	optimální	maximální	minimální	optimální	maximální
zalesněný povrch	rela0.080	0.100	0.120	-	0.100	-
vrbový porost	-	-	-	-	0.150	-
husté zatravnění, roztroušené křoví	-	-	-	-	0.050	-
stromy a křoví	0.040	0.060	0.080	-	0.060	-
louky	0.025	0.030	0.035	-	0.030	-
orná půda	0.020	0.030	0.040	-	0.030	-
nesouvislá zástavba	0.030	0.040	0.050	-	0.040	-
průmyslová zóna	0.080	0.100	0.120	-	0.100	-
silnice	0.010	0.010	0.010	-	0.010	-
Rožnovská Bečva	0.035	0.045	0.05	-	0.045	-
Zašovský potok	0.035	0.045	0.050	-	0.045	-
Zašovský náhon	0.022	0.027	0.033	-	0.027	-
revitalizovaný náhon	-	-	-	-	0.035	-
vodní plocha	0.005	0.005	0.005	-	0.005	-

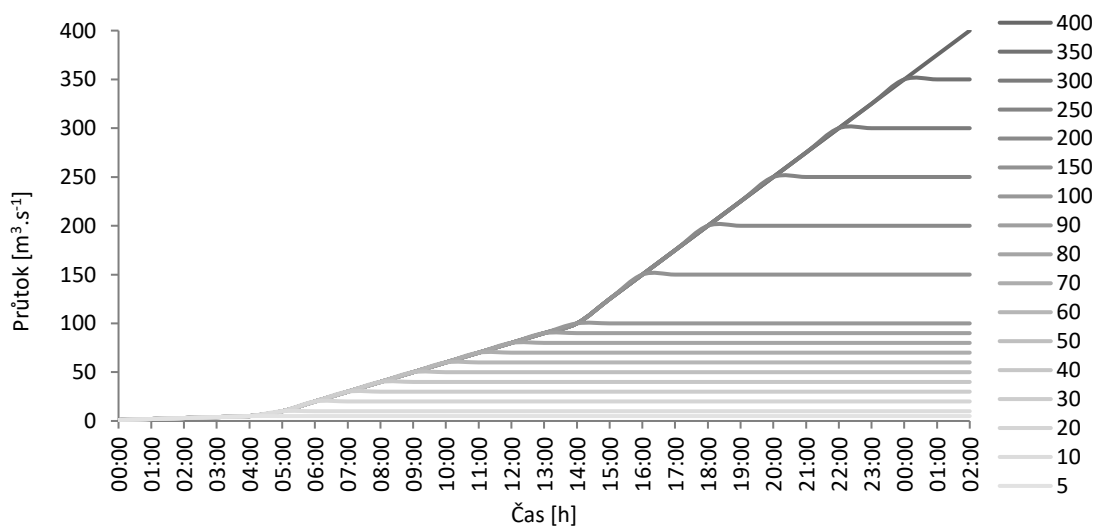
Vytvořená síť byla pro kontrolu vlivu efektu hustoty výpočetní sítě porovnána s návrhem jemnější výpočetní sítě (10 x 10 m). V místě liniových prvků byl rozměr buněk zachován a celkový počet buněk tak činil 61281, tedy cca 3x více než u původní sítě. Výsledky v rozsahu záplavy se významně nelišily, výrazný rozdíl byl však v hodnotách kulminačních průtoků hydrogramů, který byl cca 1,2x vyšší u hustší sítě. Zásadní rozdíl vyplynul u doby trvání výpočtu, který v prvním případě trval po dobu 1 h, ale u hustší sítě více než 10 h. Výpočty byly v obou případech prováděny na čtyřjádrovém plnonapětovém procesoru Intel Core i7-7700HQ s frekvencí 2800 až 3800 MHz. S ohledem na to, že model nebyl kalibrován a výsledky simulací byly hodnoceny relativně, bylo rozhodnuto o použití hrubší výpočetní sítě k simulaci.

Aby byly zohledněny drsnostní podmínky půdního povrchu a koryta, byla v programu ArcMap provedená ruční vektorizace půdního povrchu, aby co nejpřesněji odrážela místní situaci. Jednotlivým typům půdního pokryvu byly přiřazeny hodnoty drsnostního koeficientu podle Manninga, které byly převzaty z BRUNNER (2016b). Tyto hodnoty byly poté v prohlížeči RAS Mapper importovány a přiřazeny k dané geometrii pomocí funkce *Manage Geometry Associations*. Použité hodnoty drsnostního koeficientu pro jednotlivé typy povrchu původní a revitalizované situace jsou uvedeny v Tab. 4.2.

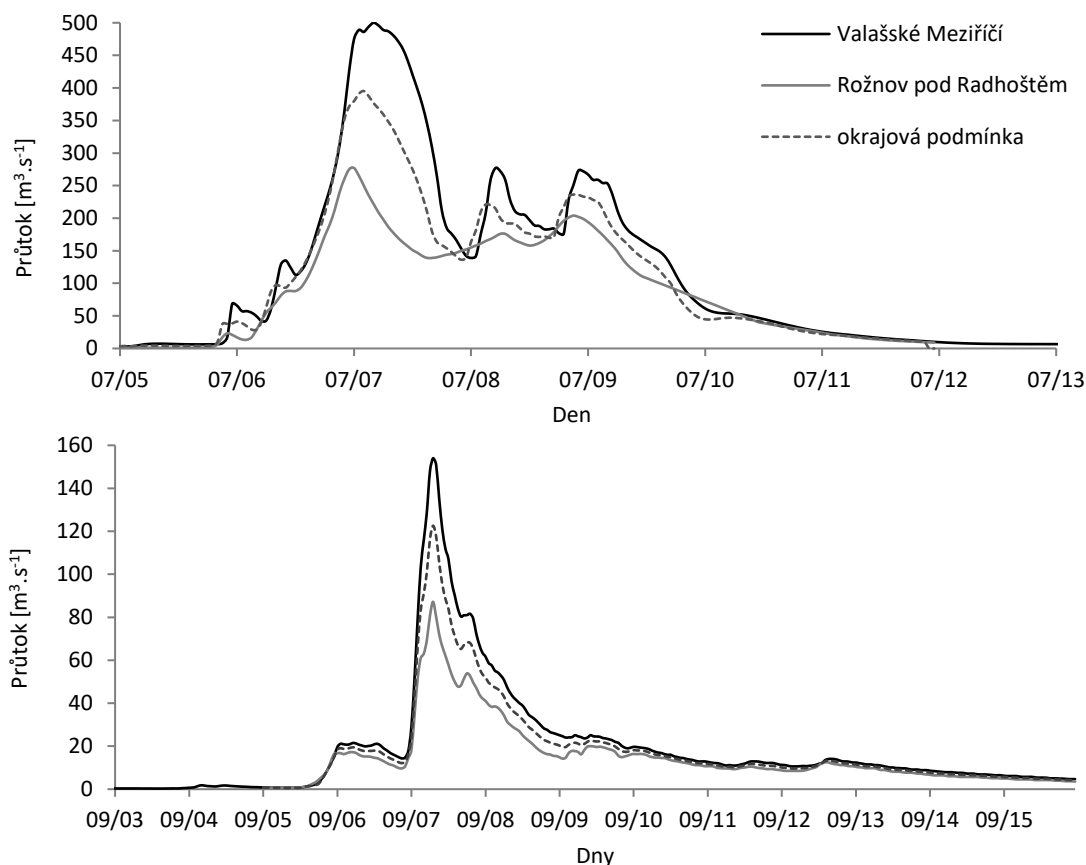
4.2.2. Simulace neustáleného proudění

Vzhledem k záměru modelování povodňových vln a postupně vzrůstajících průtoků, které se mění v čase, bylo nutné pro modelování zvolit simulaci neustáleného proudění. Před samotným výpočtem byly nejprve vytvořeny okrajové podmínky modelu, které jsou rozhraním pro vstup hydrologických údajů do modelu. Vytvoření okrajových podmínek proběhlo pomocí nástroje *SA/2D Areas BC Lines*. Okrajové podmínky byly ručně nakresleny na vnější straně hranice výpočetní sítě na místě přítoku a odtoku z koryta. Jako parametr vstupující do horní okrajové podmínky byl zvolen hydrogram průtoků. Jako parametr dolní okrajové podmínky byla určena normální hloubka, která je v řadě případů aproximací sklonu údolního dna (zde 0,005). Modelování efektu revitalizačních opatření na změnu retence vody v říční nivě bylo provedeno v režimu neustáleného proudění za použití rovnic difuzní vlny.

Pro simulaci efektu revitalizačních opatření byly použity dva typy hydrologických dat. V prvním případě byla využita sada 17 řad hypotetických průtoků (5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 m³.s⁻¹) s postupným nárůstem průtoků v každé řadě zamezující nárazovitému zaplavení modelovaného území s délkou doby simulace 22 h (Obr. 4.8). Výběr konečných hodnot průtoků řad byl zvolen tak, aby byly detailněji popsány menší hodnoty průtoků (5-90 m³.s⁻¹), kde se od hodnoty 10 m³.s⁻¹ navyšuje hodnota další řady o 10 m³.s⁻¹. Od hodnoty 100 m³.s⁻¹ je interval zvýšen na hodnotu 50 m³.s⁻¹. Tyto hydrologické údaje sloužily k analýze efektu revitalizačních opatření na změnu zaplavených objemů v říční nivě, změnu rozsahu zaplavení, změnu výšky hladin a změnu rychlostí proudění vzhledem k vybraným průtokům.



Obr. 4.8: Sada 17 řad hodinových průtoků sloužící ke zhodnocení efektu revitalizačních opatření na změnu retence vody v říční nivě



Obr. 4.9: Pozorované hydrogramy povodňových událostí 1997 (nahore) a 2007 (dole) na stanicích Valašské Meziříčí a Rožnov pod Radhoštěm sloužící k výpočtu hydrogramu určeného jako horní okrajová podmínka modelu

Druhým typem byly hydrogramy dvou povodňových událostí o různých N letostech, a to povodně z roku 1997 (Q_{100}) a povodně z roku 2007 (Q_5).

Jelikož ani jedna ze stanic není přímo lokalizována na počátku ani na konci modelovaného území, bylo za účelem simulace alespoň přibližné velikosti povodňové vlny vstupující do modelovaného území přistoupeno k manuální úpravě hydrogramů obou povodňových událostí vycházející ze zohlednění přítoků z přilehlých subpovodí. Úprava proběhla na základě rozdílu pozorovaných hydrogramů mezi měrnými stanicemi. Tento rozdíl byl poté pro jednotlivá subpovodí vynásoben faktorem podílu subpovodí na celkové ploše povodí mezi měrnými stanicemi, čímž byly získány přibližné hodnoty průtoků jednotlivých přítoků. K získání vstupního hydrogramu v horní okrajové podmínce modelu byly od pozorovaného hydrogramu na stanici Valašské Meziříčí odečteny vypočtené hodnoty všech přítoků sahajících až k umístění horní okrajové podmínky v modelovaném území. Hydrogramy pozorovaných a vypočtených průtoků jsou uvedeny na Obr. 4.9.

Přestože vodní náhon neústí přímo do Rožnovské Bečvy, ale je zaústěn do toku Zašovského potoka (ř. km) byly pro analýzu vlivu samotných změn náhonu průtoky Zašovského potoka zanedbány.

V záložce *Calculation Options and Tolerances* dialogového okna *Unsteady Flow Analysis*, bylo ponecháno veškeré nastavení 2D výpočtu a tolerancí v defaultní podobě včetně výpočetní metody, která byla ponechána v podobě *Diffusion wave*.

Pro dosažení stability modelu bylo vyzkoušeno několik výpočetních intervalů, jejichž časový krok byl postupně zkracován. Jako nejefektivnější se osvědčil výpočetní interval simulace v 15 s kroku, kdy bylo dosaženo stability výsledků na všech pozorovaných profilech. S dalším zkracováním časového intervalu nebyly zjištěny žádné změny ve výsledcích simulace a vzhledem k prodlužování doby výpočtu modelu se zkracováním výpočetního intervalu byl 15s interval zvolen jako finální pro referenční simulace i simulace revitalizačních opatření. Výstupní interval byl zvolen na 1 h.

4.3. Analýza výsledků

Zhodnocení efektu revitalizace na změnu retence vody v říční nivě bylo provedeno srovnáním vždy čtyř situací. První situace představovala současný stav, tj s rastrem terénu bez revitalizačních úprav a hodnotami drsnostního koeficientu popisující současný stav půdního povrchu. Zbylé tři situace představovaly varianty vývoje půdního pokryvu s odlišnými hodnotami drsnostního koeficientu. Jako terénní podklad sloužil rastr s návrhem revitalizovaného koryta.

Hodnocení efektu revitalizačních úprav mezi simulovanými situacemi bylo provedeno na základě několika vybraných proměnných, a to objemu vody v inundaci, ploše rozlivů, nadmořských výškách hladin v korytě, rychlostech proudění v korytě a nivě a kulminačních průtocích. První tři typy proměnných byly hodnoceny za použití sady 17 řad hypotetických průtoků (Obr. 4.8). V závislosti na těchto průtocích byla zkoumána změna těchto proměnných. Transformace kulminačních průtoků byla hodnocena na povodňových vlnách z let 1997 a 2007. Pro každou situaci tak bylo provedeno vždy 19 simulací. Celkem se tedy jednalo o 114 simulací (pro původní situaci byly navíc za účelem analýzy nejistot simulovány také situace s maximální a minimální hodnotou drsnostního koeficientu, viz kap. 4.4.). Změny mezi výsledky simulací původní situace a simulací návrhů revitalizací byly vyčísleny jako procentuální i absolutní změny, jejichž hodnoty byly vyneseny tabulárně a v podobě grafů. Výsledky byly také doplněny mapovým zobrazením rozsahu záplav s hloubkami a rychlostmi proudění.

4.3.1. Změna zatopených objemů

Analýza změny zatopených objemů v inundaci před a po revitalizačních opatřeních byla provedena za využití sady 17 řad hypotetických průtoků. V prostředí RasMapper programu HEC-RAS byly vygenerovány pro jednotlivé situace výsledky v podobě maximální dosažené nadmořské výšky hladin pro každou simulaci průtoků ve formě rastru. Další kroky byly prováděny v prostředí programu ArcMap.

Zde byl rastr nadmořských výšek hladin vždy upraven tak, aby pokrýval pouze plochu říční nivy bez hlavního koryta Rožnovské Bečvy. Tento krok byl proveden pomocí nástroje *Extract by Mask*, do kterého byly zadány vstupní hodnoty rastru nadmořských výšek hladin a polygon simulovaného území bez hlavního koryta. Tímto byl získán „výřez“ rastru nadmořských výšek hladin pouze na území říční nivy. Objem vody nacházející se v prostoru říční nivy byl vypočten pomocí nástroje *Cut Fill*, do kterého vstoupily hodnoty rastru nadmořských výšek hladin a rastr popisující nadmořskou výšku terénu. Výpočet objemu byl proveden podle vztahu:

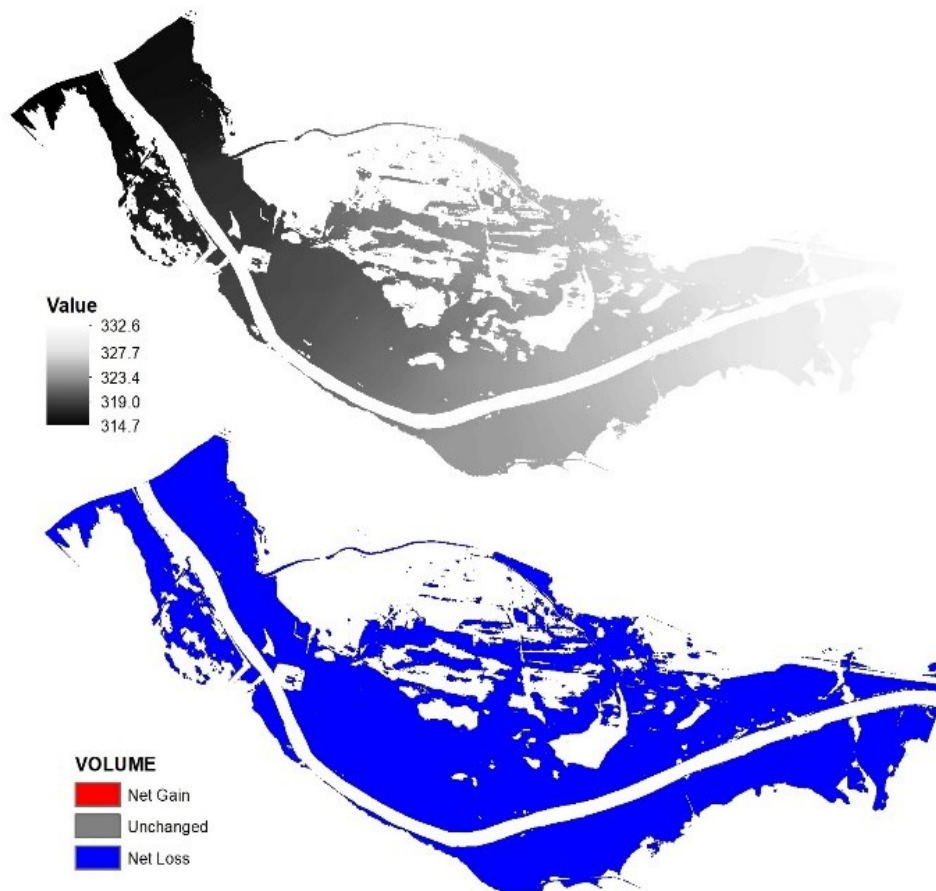
$$V = S * \Delta Z \quad (4.4)$$

kde:

S – plocha buňky rastru

ΔZ – rozdíl mezi nadmořskými výškami dvou buněk rastru

Při odečtení menší hodnoty rastru od vyšší, je výsledná hodnota kladná a nástrojem je označena jako *Net Loss*. V místech, kde byl výsledek záporný, chápe nástroj situaci jako „přidání materiálu“ a označuje ji jako *Net Gain*. Jak je patrné z ilustračního Obr. 4.10 (dole), veškerá plocha v říční nivě byla označena jako Net Loss, tedy kladný výsledek rozdílu mezi povrchem a hladinami nadmořské výšky. Suma objemů byla pro každou situaci za vybraných průtoků zjištěna ze statistiky atributové tabulky.



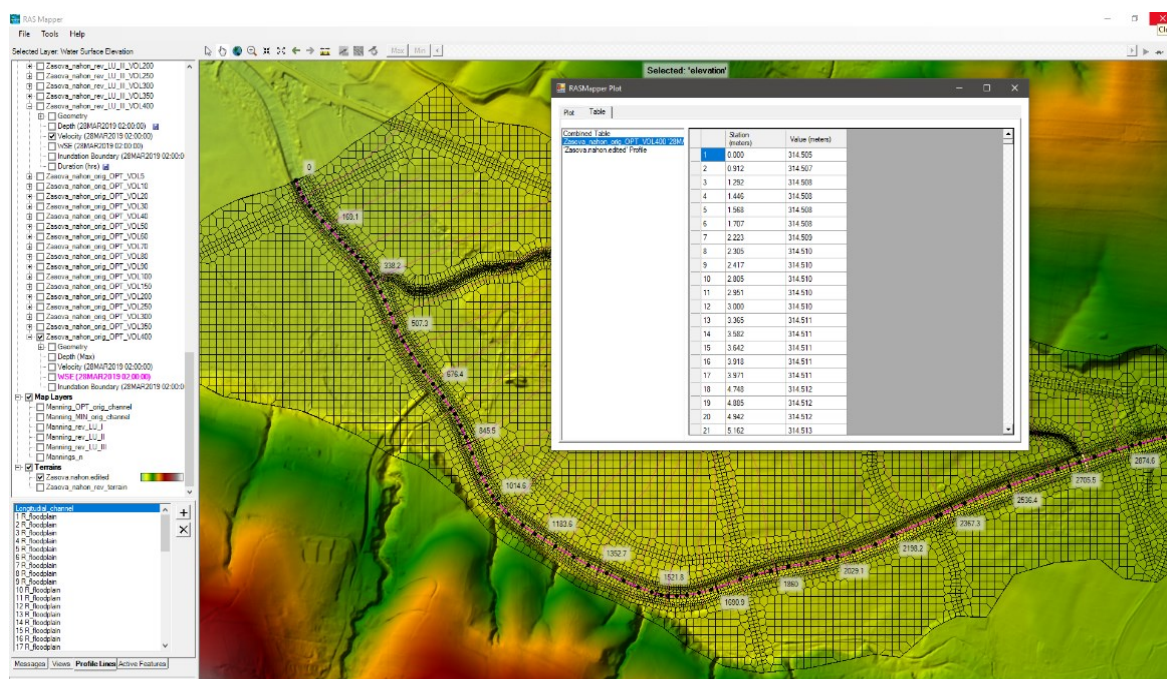
Obr. 4.10: Výpočetní kroky v programu ArcMap k získání hodnot zatopených objemů v říční nivě. Rastr nadmořských výšek hladin (nahore). Rastr s hodnotami objemů po použití nástroje *Cut Fill* (dole)

4.3.2. Změna plochy zaplavení

Zhodnocení změn zaplavených ploch v říční nivě před a po revitalizačních opatřeních bylo opět simulováno na vybraných řadách průtoků, vzhledem ke kterým byly změny vztahovány. Jako výsledky simulací byly použity hranice inundovaného území, které byly ve formátu SHP importovány do programu ArcMap, ve kterém byla ze statistiky atributových tabulek zjištěna celková zaplavená plocha.

4.3.3. Změny ve výšce hladin v korytě

Kromě výsledků v podobě rastru poskytuje HEC-RAS výsledné údaje také v tabulární podobě. Tyto údaje byly využity pro zhodnocení změn ve výšce nadmořských hladin. Za tímto účelem byl v prostředí RasMapper vytvořen podélný profil v korytě Rožnovské Bečvy, ze kterého byly zjištěny údaje o chodu hladin (Obr. 4.11).



Obr. 4.11: Ukázka tabulárního vyjádření staničení a hladin nadmořských výšek podélného profilu v modelovaném úseku koryta Rožnovské Bečvy mezi 5,555 ř. km – 8,781 ř. km v prostředí RasMapper.

4.3.4. Změna rychlostí proudění

Stejným způsobem, jakým byly získány nadmořské výšky hladin, byly získány také hodnoty rychlosti proudění v korytě. Kromě rychlostí v podélném profilu byly vizuálně analyzovány také změny rychlostí proudění v nivě při průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Hodnoty rychlostí byly poté pro každý profil zprůměrovány a vyneseny do grafu vzhledem ke staničení na hlavním toku.

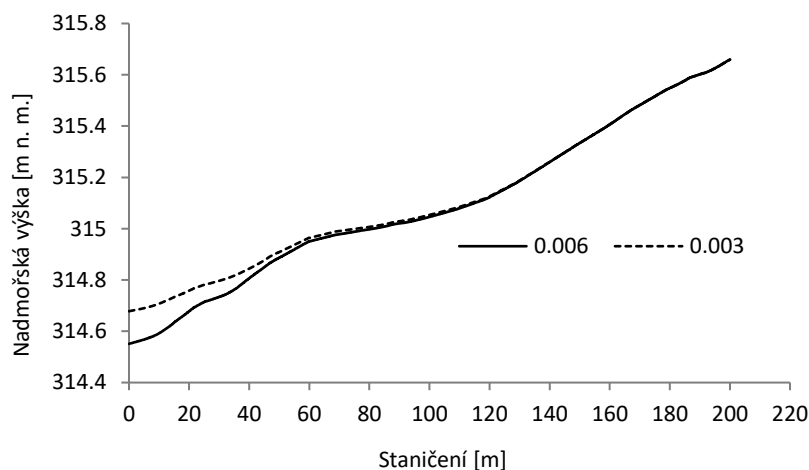
4.3.5. Transformace kulminačních průtoků

Poslední analyzovanou proměnnou byly kulminační průtoky povodňových situací z roku 1997 a 2007. Vzhledem k záměru analýzy a pro efektivnější manipulaci s daty byly pro analýzu transformace hydrogramu z roku 1997 použity hodnoty průtoků nad $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Pro situaci z roku 2007 byla použita část hydrogramu nad $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Pro jejich analýzu bylo opět využito prohlížeče RasMapper, kde bylo v korytě narýsováno 30 shodných příčných profilů s rozestupem 100 m a délkou 67 m. Z těchto příčných profilů byly vybrány ty hydrogramy, v jejichž případě došlo k pozorovatelné změně v prokazatelnosti výsledků oproti předchozím hydrogramům.

4.4. Zhodnocení nejistoty modelu

Protože se v závěrovém profilu modelovaného území nenachází žádná vodoměrná stanice, nejsou tak ani k dispozici údaje, které by mohly být použity ke kalibraci modelu. I přesto, že výsledky simulací byly porovnávány relativně a nejednalo o stanovení přesných hodnot hladin, rychlostí či průtoků, bylo přikročeno ke zhodnocení jisté míry nejistoty modelu, která se promítla ve výsledcích modelu. Pro tyto účely byla použita citlivostní analýza, založená na hodnotách drsnostních koeficientů, které běžně slouží ke kalibraci modelu.

Citlivostní analýza byla založena na výsledcích simulací původní situace, u níž byly kromě optimálních hodnot drsnostních koeficientů půdního pokryvu využity také jeho maximální a minimální hodnoty (Tab. 4.2). Výsledné hodnoty simulací původní situace s okrajovými hodnotami drsnostních koeficientů tak určily pro výsledky simulací revitalizačních opatření interval nejistot modelu, ve kterém se výsledky mohly pohybovat. Výsledky nacházející se uvnitř tohoto intervalu tak nebylo možné považovat za prokazatelné, jelikož srovnatelná změna by mohla být způsobena pouze vlivem různých drsnostních parametrů původní situace. Výsledné hodnoty nacházející se mimo tento interval byly považovány za pozitivní a výsledný efekt úprav na danou proměnnou byl zhodnocen jako prokazatelný.



Obr. 4.12: Výsledky citlivostní analýzy okrajové podmínky normální hloubky v modelu HEC-RAS s polohami nadmořských výšek hladin na počátku modelovaného úseku při hraničních hodnotách normální hloubky (0.006 a 0.003).

Další uvažovanou nejistotou modelu byl vliv dolní okrajové podmínky, kterou byla zvolena normální hloubka. Pro určení vzdálenosti možného vlivu dolní okrajové podmínky na výsledky bylo využito citlivostní analýzy dle Goodela (2010). Pro citlivostní analýzu byly odhadnuty možné reálné hraniční hodnoty okrajové podmínky (zde 0,006 a 0,003), které byly použity při simulaci nadmořských výšek hladin.

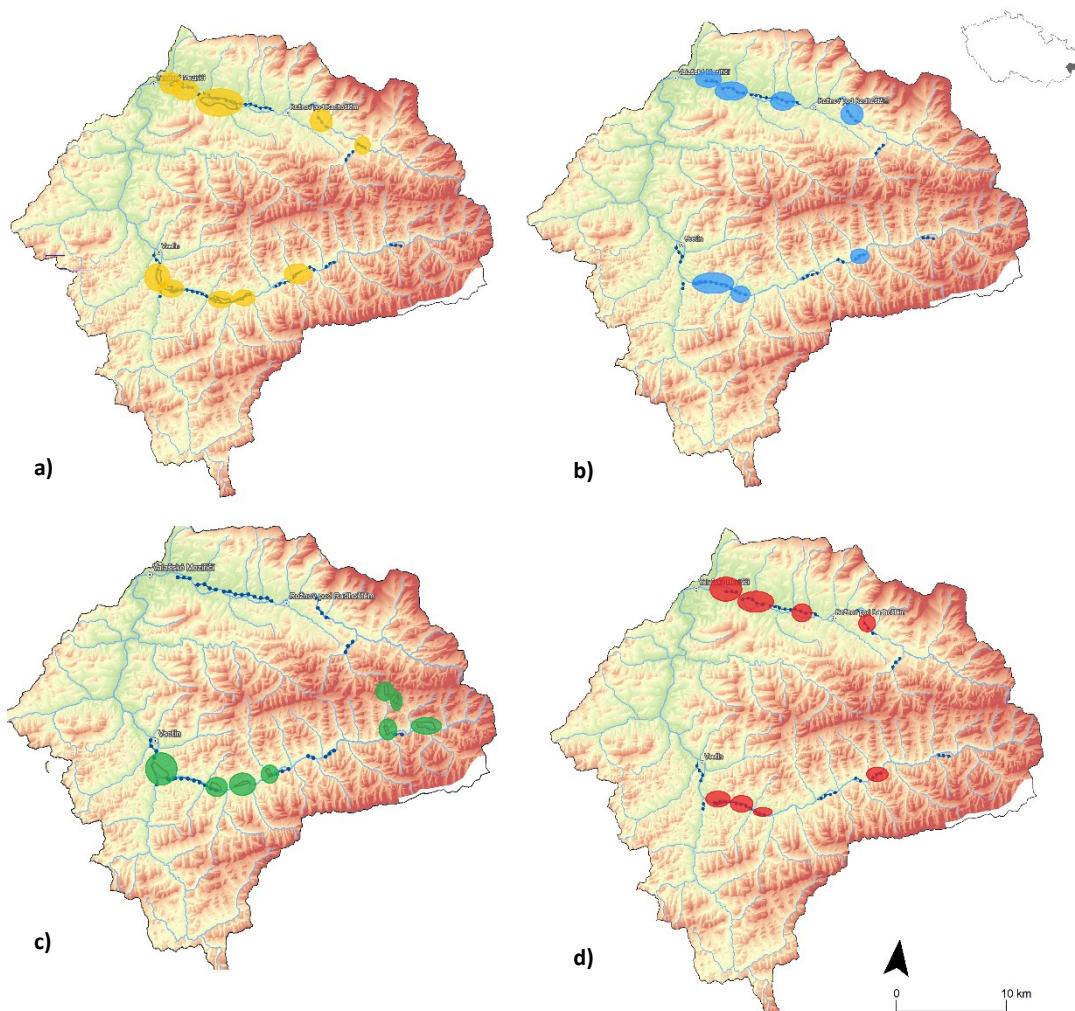
Z výsledků simulace byla zjištěna vzdálenost bodu rozchodu křivek nadmořských výšek hladin od počátku modelovaného úseku. Jak je patrné z Obr. 4.12, tento bod se nachází přibližně ve vzdálenosti 120 m od počátku modelovaného území. V této oblasti je tak možné počítat se zkreslením výsledků simulací vlivem okrajové podmínky.

5. Výsledky

5.1. Vybraná lokalita a návrhy revitalizačních úprav

5.1.1. Výběr lokality a její charakteristika

Výběr lokality byl proveden na základě konfrontace výsledků inventarizace vodních náhonů zpracovaných v bakalářské práci autorky s návrhy PPO uvedenými v *Plánech dílčího povodí Moravy a přítoků Váhu* (PDP, 2015), protipovodňových plánech Zlínského kraje uvedených ve *Studii na ochranu před povodněmi na území Zlínského kraje* (aktualizace k roku 2013) (HYDROPROJEKT CZ, 2013) a se *Studii proveditelnosti revitalizace Bečvy Vsetínské od ř. km 82,500 až k pramenným úsekům*, zadané od spolku Koalice pro řeky, z. s. (z roku 2015) (KOALICE PRO ŘEKY, 2015). Výsledkem předchozích kroků je syntéza, ze které vzešlo celkem 8 lokalit s územním překryvem návrhů opatření a výskytem vodních náhonů (Obr. 5.1).



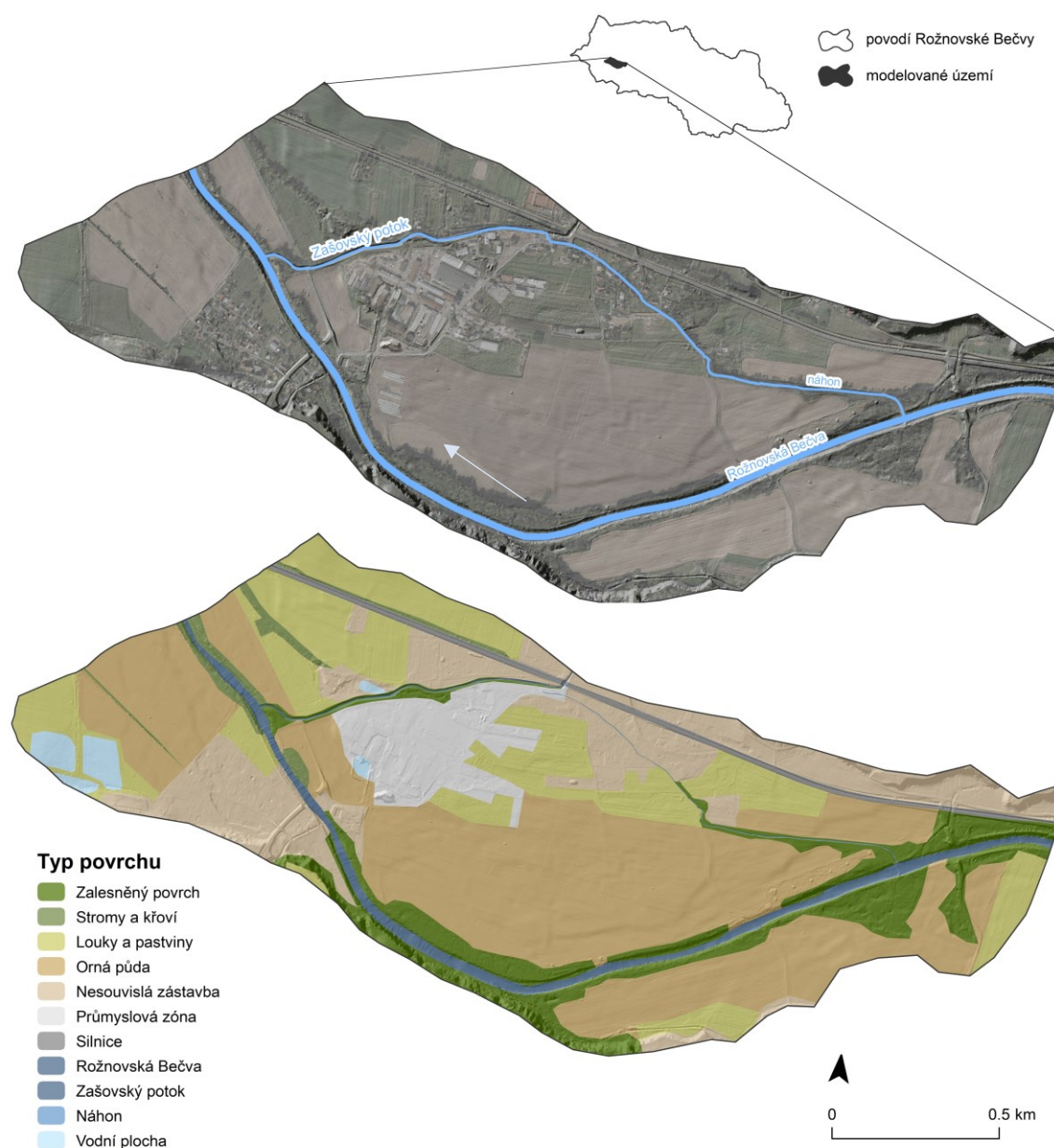
Obr. 5.1: Konfrontace výsledků inventarizace vodních náhonů v povodí Vsetínské a Rožnovské Bečvy s návrhy opatření protipovodňové studie Zlínského kraje (a), doporučenými lokalitami PMO s.p. (b) a návrhy opatření studie proveditelnosti Koalice pro řeky z.s. (c). Výsledky syntézy (d)

Největší shoda mezi lokalizací náhonů a návrhů PPO panovala s protipovodňovou studií Zlínského kraje. Zde se z celkem 10 lokalit určených buď k řízení inundací, nebo funkci suchých nádrží, 6 lokalit shodovalo s lokalitami, kterými protékaly náhony (Obr. 5.1., a). Shoda pouze v jedné lokalitě je se studií proveditelnosti na toku Vsetínská Bečva, a to hlavně z toho důvodu, že řada opatření je soustředěna do horských oblastí přítoků (Obr. 5.1., c). Plány dílčího povodí Moravy a přítoků Váhu zato neobsahovaly žádné návrhy, které by se překrývaly s lokalitami náhonů, nebo nejsou prozatím k dispozici. Problematika tak byla konzultována s pracovníky Povodí Moravy, s. p. provozu ve Valašském Meziříčí. Závěrem konzultace bylo vybrání 7 lokalit s protékající náhony (Obr. 5.1., b), které disponovaly potenciálem ke zvýšení retence vody v říční nivě. Pro druhé plánovací období jsou mimo jiné pro povodí Rožnovské Bečvy v plánech PDP (2015) uvedena opatření obecnější povahy zpravující o problémech v tamějších lokalitách. Vzhledem k nedostatku informací však není tento typ opatření popsán do takového detailu, aby jej bylo možné porovnat s lokalitami náhonů. Řadu těchto obecných opatření je však možné považovat za aplikovatelné pro zaměření tématu DP. Jedná se výběrově o opatření *Podpora retenční a infiltrační schopnosti půd, omezení povrchového odtoku a jeho přeměna na podzemní, redukce nevhodně odvodněných pozemků* (MOV215004), *Revitalizace vodních toků* (MOV212501), *Přírodě blízké PPO v OsVPR – Záměry navrhovatelů* (MOV212504).

Pro další směřování diplomové práce bylo rozhodnuto o výběru pouze jednoho ze dvou povodí, a to povodí Rožnovské Bečvy, které bylo využito pro určení konkrétního zájmového území ke studiu potenciálu revitalizačních opatření ve zvýšení retence vody v říční nivě. Z pohledu možné aplikace zvoleného modelu bylo výsledně ze 4 potenciálně vhodných lokalit vybráno území s náhonem v obci Zašová (Obr. 5.2).

Vybraný modelovaný úsek se nachází mezi 5,555 ř. km – 8,781 ř. km Rožnovské Bečvy. Vodní náhon, který byl vybrán pro návrh revitalizačních úprav, vytéká z Rožnovské Bečvy na jejím 8,301 ř. km s ústím do Zašovského potoka na 0,883 ř. km, který ústí do Rožnovské Bečvy na jejím 5,590 ř. km. Délka samotného náhonu je 1,3 km, a spolu se Zašovským potokem činí 2,2 km.

Prostor mezi počátkem náhonu a zaústěním Zašovského potoka na pravém břehu říční nivy Rožnovské Bečvy je z velké části využíván jako zemědělská plocha (Obr. 5.4, nahoře). Jeho značnou část pokrývá také průmyslový areál (Obr. 5.2, dole). Zbylé plochy jsou tvořeny nesouvislou zástavbou rodinných domů a zahrádkářských kolonií s loukami. Více jak polovina trasy náhonu je od jeho počátku doprovázena vzrostlou vegetací stromů, křoví a nižšího bylinného patra (Obr. 5.3). Druhá polovina protéká obydlenou oblastí (Obr. 5.4, dole).



Obr. 5.2: Vybrané modelované území mezi 5,555 ř. km – 8,781 ř. km Rožnovské Bečvy v obci Zašová s tokem Rožnovské Bečvy a zkoumaným náhonem (nahore). Současné využití půdního povrchu (dole)



Obr. 5.3: Stavidlo na počátku náhonu na 8,301 ř. km Rožnovské Bečvy (nahore). Charakter koryta náhonu a doprovodné vegetace na jeho 1.035 ř. km (dole).
(foto: archiv autorky, září 2016)



Obr. 5.4: Zemědělsky využívaná říční niva v okolí první poloviny náhonu (nahore). Charakter koryta náhonu a doprovodné vegetace v lokalitě zástavby na 0.225 ř. km náhonu (dole).
(foto nahore: archiv autorky, září 2016)
(foto dole: zdroj mapy.cz)

5.1.2. Návrh revitalizačních úprav

Návrh trasy a příčného profilu koryta

Výsledným návrhem revitalizačního opatření koryta náhonu bylo vytvoření tří úseků (Obr. 4.4). Revitalizační opatření Úseku I spočívalo ve zvýšení průtočné kapacity a rozvlnění současného koryta náhonu, který se nachází v tomto úseku. Zvýšení kapacity bylo navrhováno na přibližný dvojnásobek původní kapacity koryta ($1,76 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) z toho důvodu, aby mohl zásobovat původní i nově navrženou větev náhonu. Výsledná kapacita navrhovaného koryta v Úseku I tak činila $3,53 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, což se promítlo také do dvojnásobné plochy průtočného profilu (Obr. 5.5a). Trasa a vinutí prvního úseku byly navrženy na podkladech historických map III. vojenského mapování. Úsek III byl navrhován jako zcela nové koryto procházející říční nivou využívanou v současnosti pro zemědělské účely. Trasa koryta byla zjištěna z výsledků pomocné simulace v programu HEC-RAS, která animací proudění poukázala na preferenční trasy proudění v nivě po vybřežení vody z koryta původního náhonu. (Obr. 4.2). Pro vinutí koryta bylo využito historických map III. vojenského mapování, ze kterého byl využit charakter vinutí toků a jejich sklonitostní poměry.

Tab. 5.1: Vstupní parametry a výsledné hodnoty průtočné kapacity (Q) pro původní Úsek I a II

Úsek I						
S	O	I	n	R	C	Q
1.63	4.18	0.003	0.03	0.39	31.64	1.76
Úsek II						
S	O	I	n	R	C	Q
1.54	3.5	0.002	0.03	0.44	32.3	1.48

Tab. 5.2: Vstupní parametry a vypočtené hodnoty průtočné kapacity (Q) pro profily navrhovaných Úseků I a III

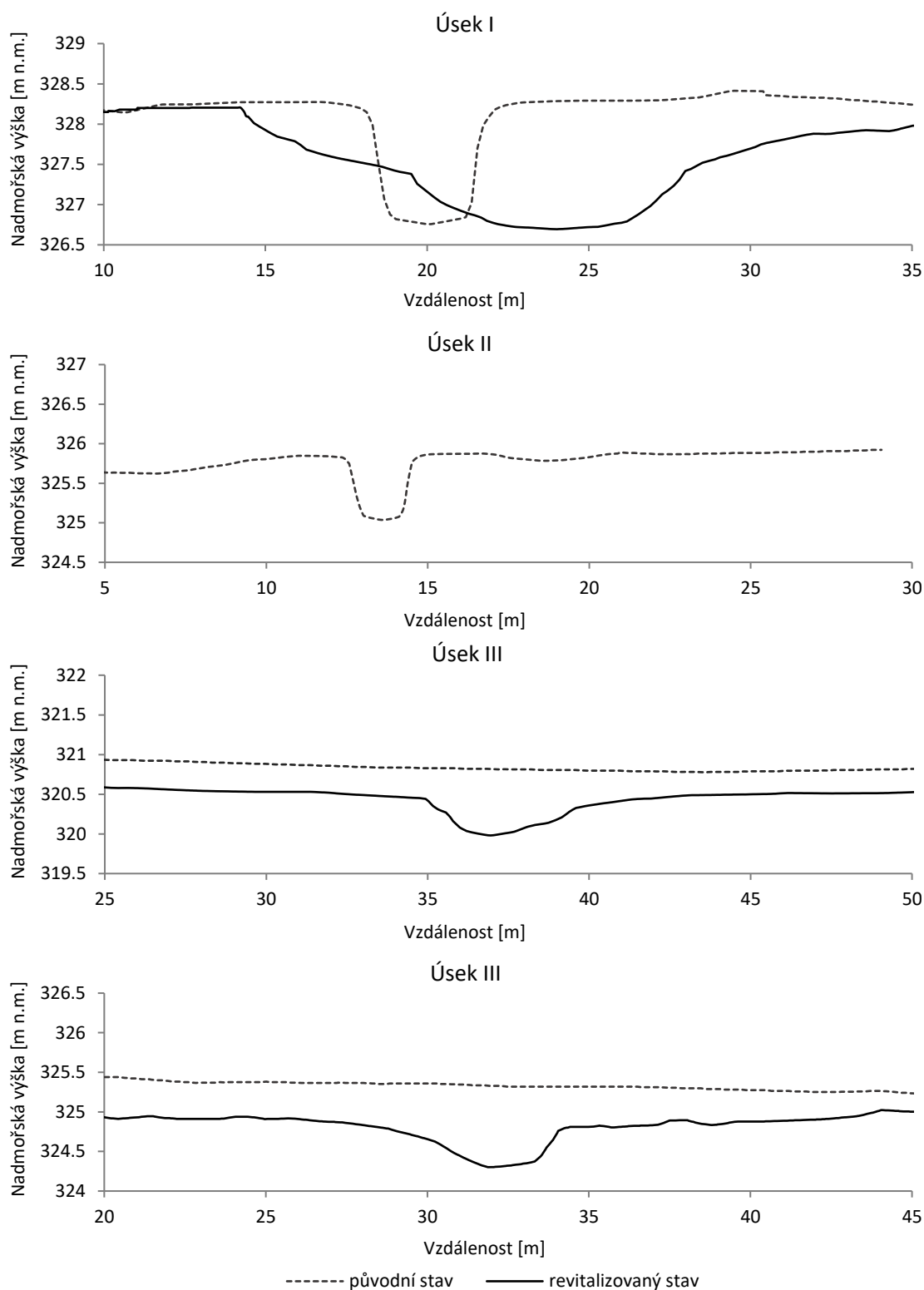
Úsek I						
S	O	I	n	R	C	Q
3.83	7	0.003	0.04	0.55	22.65	3.53
Úsek III						
S	O	I	n	R	C	Q
1.8	5	0.003	0.035	0.36	24.1	1.43

Průtočná kapacita Úseku III byla navržena tak, aby se co nejvíce shodovala s průtočnou kapacitou Úseku II ($1,48 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Výsledná hodnota činila $1,43 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Hodnoty průtočných kapacit nově navržených koryt (Úsek I a III) byly vypočteny za využití Chézyho rovnice. Pro jejich výpočet však byly nejprve pomocí Chézyho rovnice zjištěny průtočné kapacity původních koryt, které pro navrhované úseky následně sloužily jako referenční. Vstupní parametry pro výpočet průtočných kapacit jsou pro původní koryto Úseku I a Úseku II uvedeny v Tab. 5.1. Parametry Chézyho rovnice (viz. kap. 4.1.2.) pro výpočet průtočné kapacity navrhovaného Úseku I a III jsou uvedeny v Tab. 5.2. Úsek II zůstal zachován beze změn.

Tab. 5.3: Parametry příčných a podélných profilů původních Úseků I a II a úseků s revitalizačními návrhy (Úsek I a III)

Příčný profil	původní stav		revitalizovaný stav		
	úsek I	úsek II	úsek I	úsek II	úsek III
šířka koryta [m]	3.08	3.0	7.50	3.0	5.00
šířka dna [m]	1.00	0.73	1.00	0.73	1.00
hloubka [m]	0.80	0.84	0.90	0.84	0.60
průtočná plocha [m ²]	1.63	1.54	3.83	1.54	1.80
průtočná kapacita [m ³ .s ⁻¹] (Chézyho rovnice)	1.76	1.48	3.53	1.48	1.43
podélný profil					
délka [m]	631.98	1568.34	768.01	1568.34	1454.47
	2200.32		3790.82		
sklon	0.006		0.005		

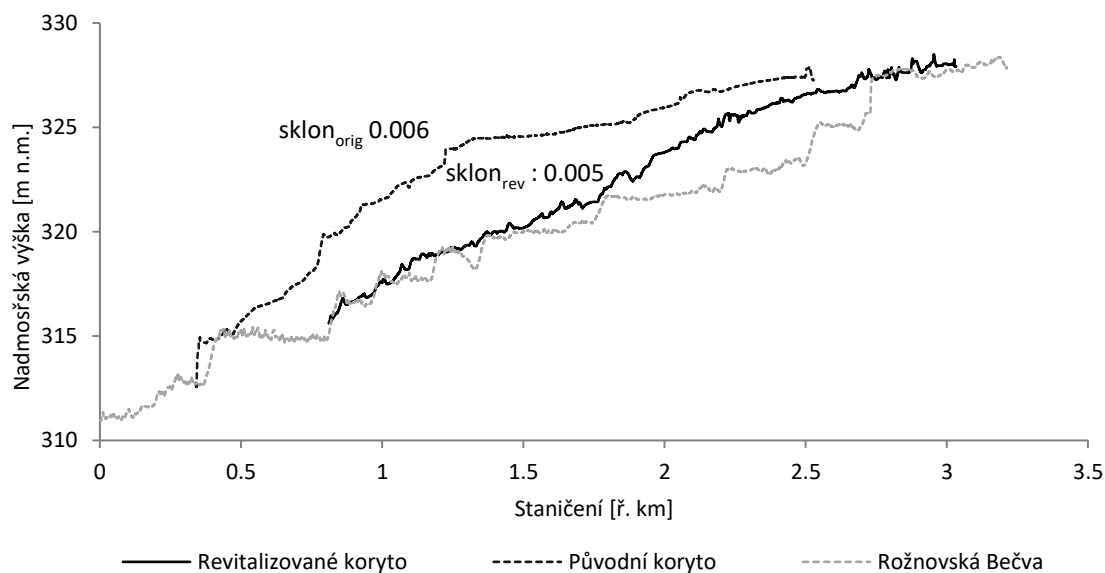
Na základě vypočtených průtočných kapacit bylo přikročeno k návrhu příčných profilů podle vzorce pro výpočet plochy lichoběžníku. Úpravami parametrů vzorce bylo dosaženo takové průtočné plochy, po jejímž dosazení do Chézyho rovnice se výsledek průtočné kapacity nejvíce přibližoval požadované hodnotě. Zároveň dosazované parametry pro výpočet plochy lichoběžníku musely splňovat předem dané požadavky na velikosti navrhovaného profilu koryta, tj. širší a mělčí koryto proti původní situaci.



Obr. 5.5: Příčné profily pro původní situace koryta náhonů a situace návrhů revitalizací koryta náhonu. a) Úsek I před (tečkovaná čára) a po (plná čára) revitalizačním návrhu, b) Úsek II bez revitalizačních návrhů, c,d) Návrh proměnlivých příčných profilů Úseku III vzhledem k poloze v korytě vs. původní poloha terénu (tečkované

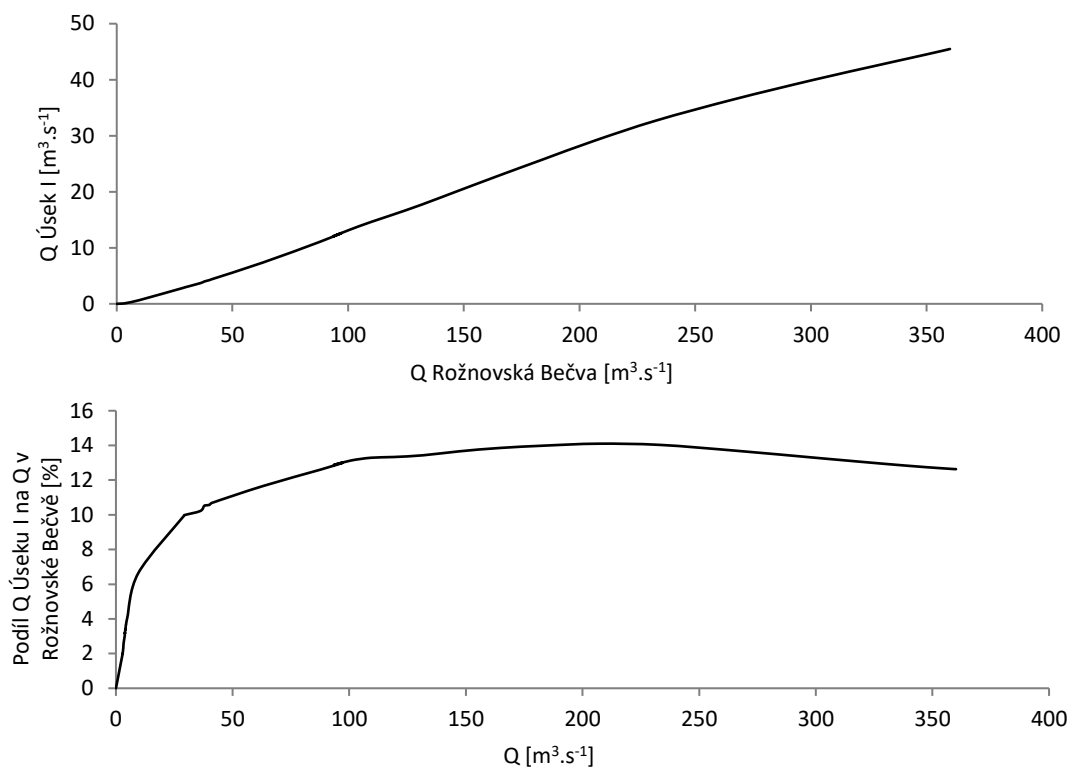
Výsledné parametry navržených i původních příčných profilů jsou spolu s výsledky průtočné kapacity uvedeny v Tab. 5.3. Hodnoty navrhovaných parametrů příčného profilu Úseku I tak činí pro šířku koryta 7,50 m, šířku dna 1,00 m a hloubku 0,90 m. Výsledné parametry zcela nově

navrženého koryta Úseku III činí pro šířku koryta 5,00 m, šířku dna 1,00 m a hloubku 0,60 m. Při návrhu příčných profilů byl navíc vždy dodržován poměr mezi hodnotou šířky koryta ke hloubce v poměru 4:1 až 10:1, vyhovující podmínkám přírodních toků. V předkládaném návrhu činí 8,3 : 1. Příklady návrhů příčných profilů na Obr. 5.5 také poukazují na asymetričnost koryta v příčných profilech (c, d) navrženého Úseku III, odrážející přírodě blízké podmínky koryta.



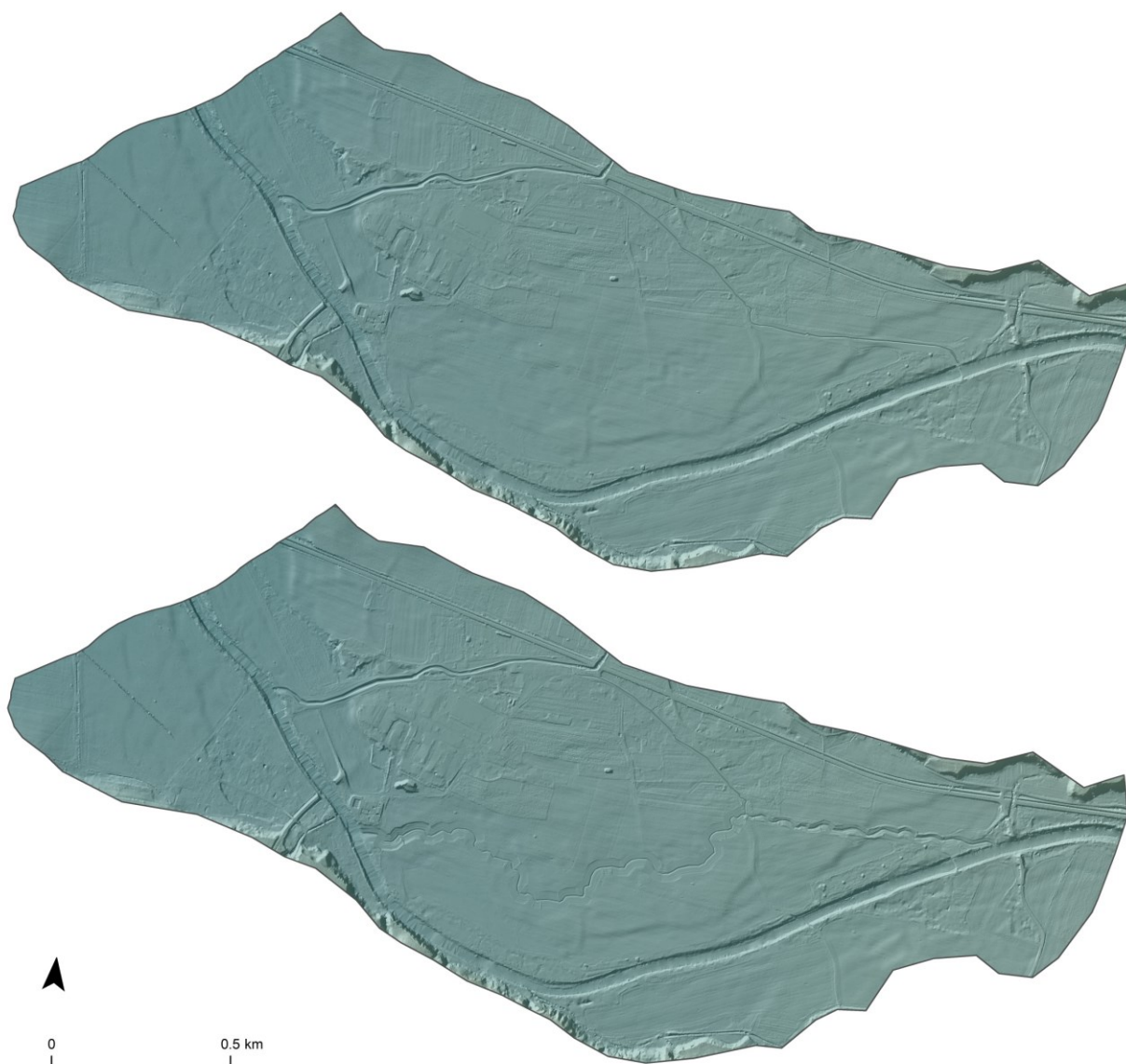
Obr. 5.6: Podélné profily pro původní situaci koryta náhonu, návrhů revitalizací koryta náhonu s hodnotou sklonu koryta („ $\text{sklon}_{\text{orig}}$ “ pro sklon původního koryta, „ $\text{sklon}_{\text{rev}}$ “ pro sklon revitalizačního návrhu koryta) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Celková délka nově navrženého koryta s Úsekem I a Úsekem III činí 2222,48 m a prodlužuje tak původní síť toků téměř o dvojnásobek původní délky. Počátek nově navrženého Úseku I je lokalizován na 8,429 ř. km Rožnovské Bečvy se zaústěním Úseku III na 6,384 ř. km Rožnovské Bečvy. Pro jednodušší manipulaci s výstupy simulací bylo staničení modelovaného úseku mezi 5,555 ř. km – 8,781 ř. km Rožnovské Bečvy upraveno tak, že jeho počátek je stanoven jako 0,000 ř. km modelovaného úseku. Staničení v modelovaném úseku je poté následující. Počátek Úseku I je lokalizován na 2,849 ř. km modelovaného úseku. Ústí Úseku III se nachází na 0,813 ř. km modelovaného úseku a ústí Úseku III na 0,344 ř. km modelovaného úseku (Obr. 5.6). Sklon nově navrženého koryta od Úseku I činí 0.005. Sklon původního koryta od Úseku I činí 0,006. Parametry nově navržených úseků koryta i původních jsou uvedeny v Tab. 5.3.



Obr. 5.7: Závislost průtoků v Úseku I na průtocích v Rožnovské Bečvě (nahore) a podíl průtoků v Úseku I na průtocích v Rožnovské Bečvě (dole) na 8.500 ř. km

Pro zjištění vztahu mezi hodnotami průtoků v nově vytvořeném korytě (Úsek I) a průtoky v Rožnovské Bečvě byly využity výstupy simulací modelu HEC–RAS. Jak je patrné z Obr. 5.7, do hodnoty $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na Rožnovské Bečvě protéká Úsekem I nejmenší podíl průtoků (až 50x menší). Po této hranici se dotování náhonu zvyšuje až do momentu vybřežení, a to přibližně při průtoku $14 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, kdy náhonem protéká cca 13 % průtoku Rožnovské Bečvy (Obr. 5.7, dole).



Obr. 5.8: Digitální model reliéfu (DMR) pro původní situaci morfologie vodního náhonu beze změny (nahoře). DMR s návrhy revitalizačních úprav náhonu (dole) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy.

Parametry návrhu koryta byly využity dále při tvorbě nového DMR, který následně sloužil pro simulace vlivu revitalizačních opatření. Vzhled upraveného DMR s původním stavem i návrhem revitalizační úpravy koryta je zobrazen na Obr. 5.8. Podrobnější návrh koryta v porovnání s původní situací se nachází v Příloze č. 2.1.. Detailnější podoba původní situace DMR a jeho upravené varianty je k nahlédnutí v Příloze č. 2.2. a 2.3..

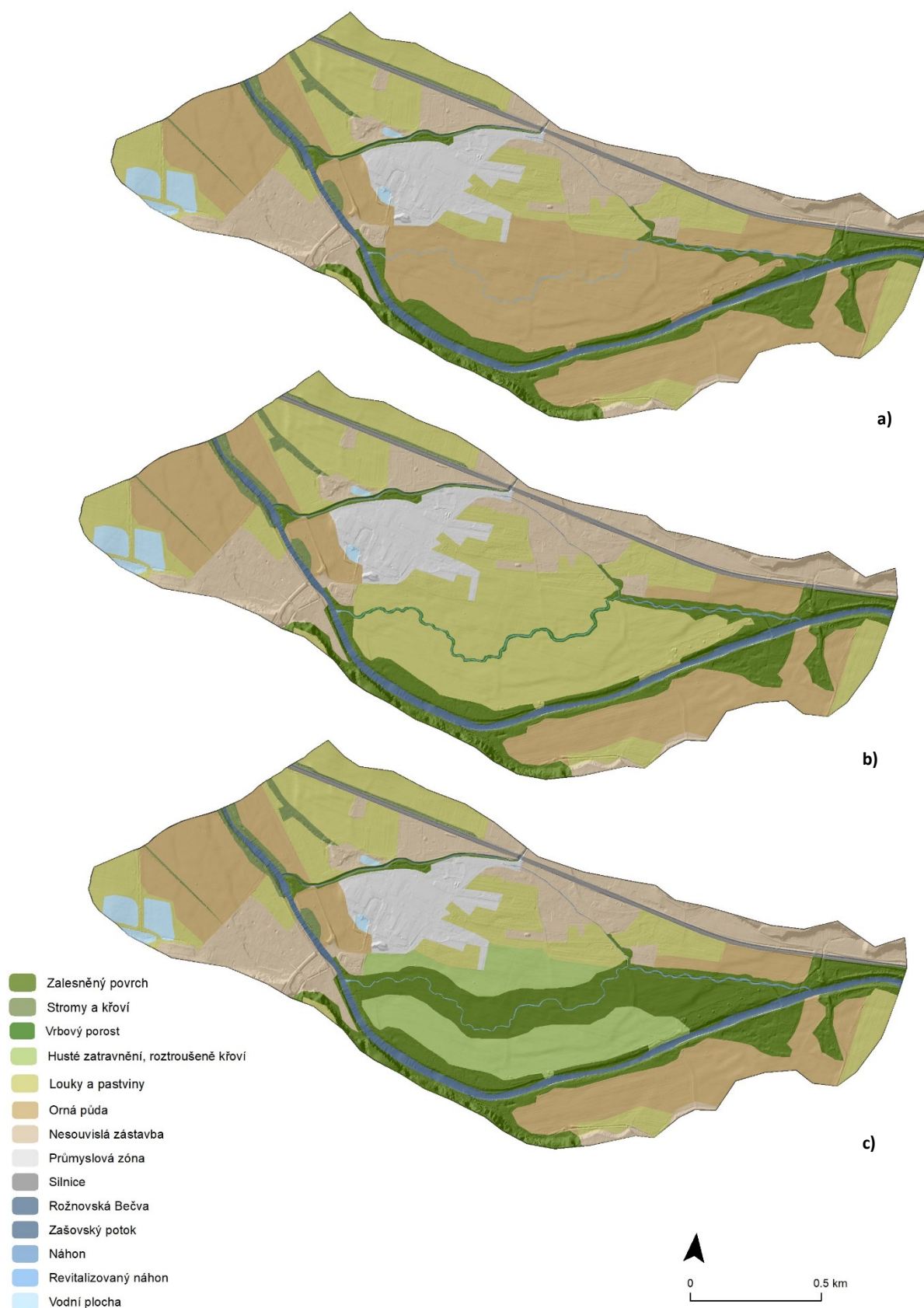
Návrh změn využití povrchu

Součástí návrhu revitalizačních opatření byl také návrh využití půdního pokryvu, jehož drsnostní parametry vstupovaly do hydraulického modelu. V modelovaném území byly návrhy lokalizovány v blízkém i širším okolí nově navržených revitalizačních úprav koryt náhonu. Výsledkem byly tři verze návrhů změn využití povrchu (LU I, LU II, LU III) napodobující postupný vývoj vegetace od počátku provedení revitalizačních úprav, tj bez jakýchkoliv změn, po situaci se vzrostlým lesem pokrývajícím značnou část přilehlého území nově navrženého koryta, a tedy i postupným zvyšováním drsnosti povrchu. Varianty návrhů jsou kromě Obr. 5.9 uvedeny včetně původní situace land use také v Příloze 3.1 až 3.4.. Procentuální zastoupení typů povrchu jednotlivých variant je zobrazeno v Tab. 5.4.

První varianta návrhu (LU I) nedisponuje žádnou změnou využití povrchu a oproti původní situaci se liší pouze přítomností nově vedeného koryta. Tato verze návrhu byla aplikována za účelem zhodnocení samotného vlivu navrženého koryta na zkoumané proměnné (Obr. 5.9c). Druhá varianta (LU II) představuje úzký vegetační pás skládající se z vrbového porostu kolem nového koryta toku. Veškerá orná půda, která pokrývala říční nivu na trase nového koryta, byla zatravněna a přeměněna na luční plochy (Obr. 5.9b). Poslední varianta simuluje zvýšený podíl zalesněných ploch říční nivy, kterou nově navržené koryto protéká. Zbylé části pokrývá hustý travní porost s občasným výskytem křovin (Obr. 5.9c)

Tab. 5.4: Procentuální podíl jednotlivých typů využití půdy pro původní situaci (LU_{orig}) a varianty návrhů revitalizačních úprav (LU I, LU II, LU III) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

typ povrchu	LU _{orig}	varianty návrhů využití půd		
		LU I	LU II	LU III
zalesněný povrch	11.5%	11.6%	11.9%	20.2%
vrbový porost	-	0.0%	0.5%	-
husté zatravnění, roztroušené křoví	-	-	-	10.8%
stromy a křoví	1.8%	1.8%	1.8%	1.8%
louky	18.3%	18.2%	36.8%	18.2%
orná půda	39.0%	38.8%	19.4%	19.4%
nesouvislá zástavba	16.6%	16.4%	16.4%	16.4%
průmyslová zóna	6.1%	6.1%	6.1%	6.1%
silnice	1.8%	1.8%	1.8%	1.8%
Rožnovská Bečva	3.2%	3.2%	3.2%	3.2%
Zašovský potok	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
Zašovský náhon	0.1%	0.2%	0.2%	0.2%
revitalizovaný náhon	-	0.2%	0.2%	0.2%
vodní plocha	1.5%	1.5%	1.5%	1.5%
Σ	100%	100%	100%	100%



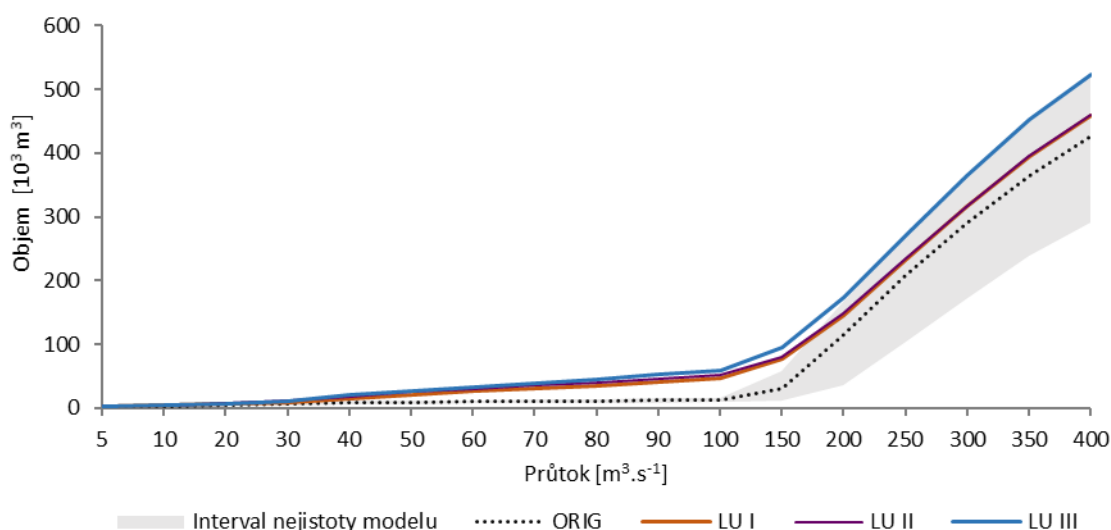
Obr. 5.9: Varianty změny využití povrchu v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy pro návrh revitalizačních úprav v oblasti navrženého koryta náhonu. a) Varianta LU I beze změn využití povrchu, pouze výskyt návrhu nově vytvořeného koryta náhonu, b) Varianta LU II s doprovodným vrbovým porostem a lučními plochami, c) Varianta LU III se zvýšeným podílem lesních ploch

5.2. Výsledky hydraulického modelování v programu HEC-RAS

Zhodnocení efektu návrhu revitalizačního opatření na změnu retence vody v říční nivě bylo provedeno na základě několika vybraných proměnných: objemu zatopeného prostoru v říční nivě, ploše rozlivů, nadmořských výškách hladin, rychlostech proudění v korytě a kulminačních průtocích. Pro jednodušší manipulaci s výstupy simulací bylo staničení modelovaného úseku mezi 5,555 ř. km – 8,781 ř. km Rožnovské Bečvy upraveno tak, že jeho počátek je stanoven jako 0,000 ř. km modelovaného úseku. Staničení v modelovaném úseku je poté následující. Počátek Úseku I je lokalizován na 2.849 ř. km modelovaného úseku. Ústí Úseku III se nachází na 0.813 ř. km modelovaného úseku a ústí Úseku II na jeho 0.344 ř. km.

5.2.1. Analýza změn objemů

Zhodnocení vlivu navržených revitalizačních opatření v říční nivě na změnu objemu zatopeného prostoru bylo posuzováno na 17 řadách hodinových průtoků. Výsledné simulované hodnoty jsou zobrazeny v Obr. 5.10, kde je patrná závislost růstu objemů zatopeného prostoru říční nivy na rostoucích průtocích.



Obr. 5.10: Rozložení hodnot objemů zatopeného prostoru říční nivy v závislosti na hodnotách průtoků pro simulaci původní situace (ORIG_{opt}) a simulace návrhů revitalizačních úprav (LU I, LU II, LU III) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Jak je z Obr. 5.10 také patrné, simulace všech tří verzí revitalizačních úprav dosahují podél celé škály simulovaných průtoků vyšších hodnot zadržených objemů, než je tomu u výsledků simulace původní situace. U objemů tří verzí revitalizačních úprav pro jednotlivé průtoky je patrný vzestup objemů s rostoucí drsností povrchu. Nejnížší hodnoty jsou dosaženy u varianty LU I, nejvyšší u varianty LU III, což lze přisuzovat pomalejším rychlostem při zvýšených drsnostech povrchu, pomalejšímu odtoku a vzduť hladiny.

Tab. 5.5: Maximální dosažené hodnoty objemů zatopeného prostoru říční nivy pro jednotlivé varianty simulací v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

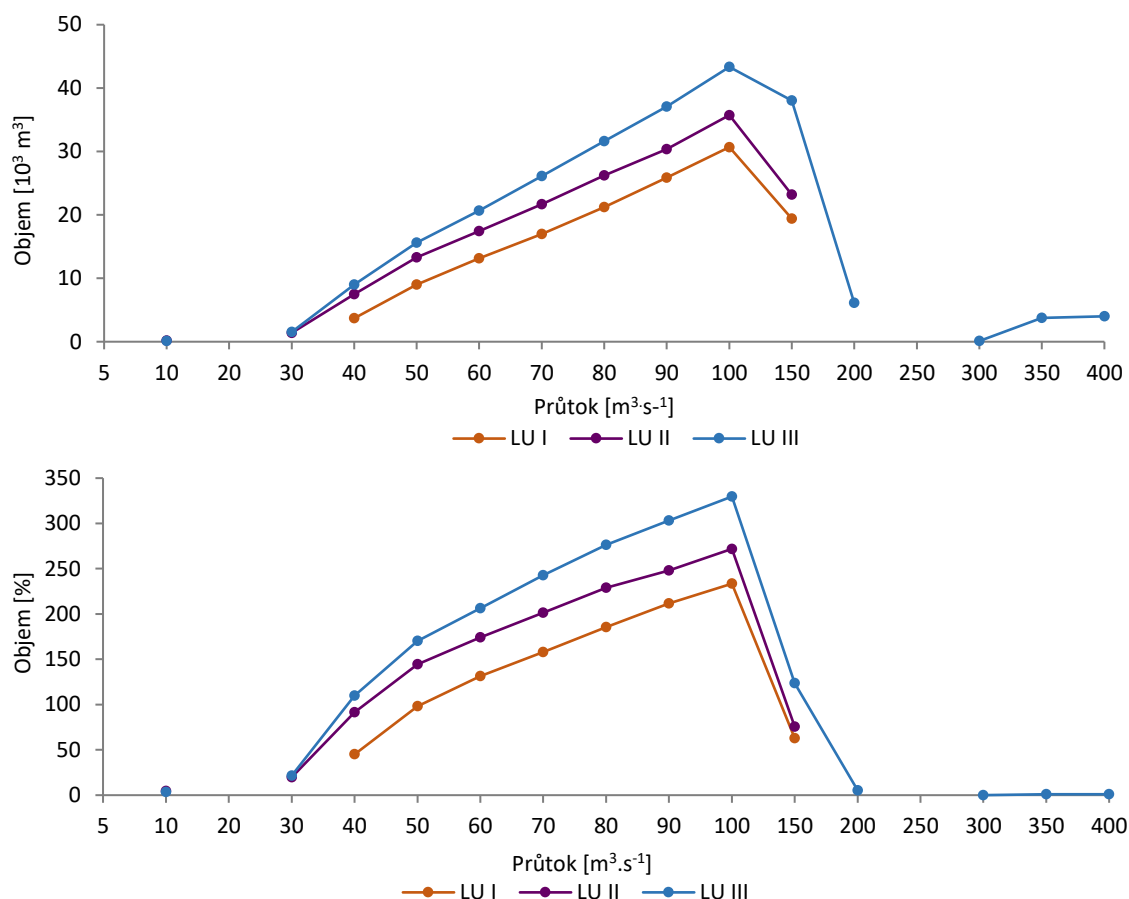
Q [m ³ .s ⁻¹]	Maximální hodnoty objemu zatopeného prostoru říční nivy [10 ³ m ³]			
	ORIG _{opt}	LUI	LUII	LUIII
400	426.59	458.54	460.47	524.34

Nejvyšší hodnoty zatopeného objemu byly dosaženy při maximální hodnotě simulovaného průtoku 400 m³.s⁻¹. Nejnižší hodnota byla dosažena u varianty LU I (458,54.10³ m³). Nejvyšší hodnoty zadrženého objemu 524.10³ m³ bylo dosaženo u simulace revitalizační úpravy LU III, tedy varianty s nejvyššími hodnotami drsnostního koeficientu, což představuje v porovnání s původní situací bez navrhovaných úprav (ORIG_{opt}) nárůst o 23 %, kde bylo dosaženo maximální hodnoty objemu v říční nivě 426.10³ m³ (Tab. 5.5). Po uvážení intervalu nejistot modelu při hodnocení výsledků, však nelze veškeré maximální hodnoty simulací považovat za prokazatelné. Jak je patrné z Obr. 5.10, jedinou simulovanou variantou revitalizačních opatření, jejíž maximální hodnota zadržených objemů leží mimo interval nejistot, a kterou je tak možné považovat za prokazatelnou, je pouze varianta LU III.

Tab. 5.6: Největší prokazatelné změny objemů zaplaveného prostoru říční nivy pro jednotlivé simulace revitalizačních opatření při průtoku 100 m³.s⁻¹ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

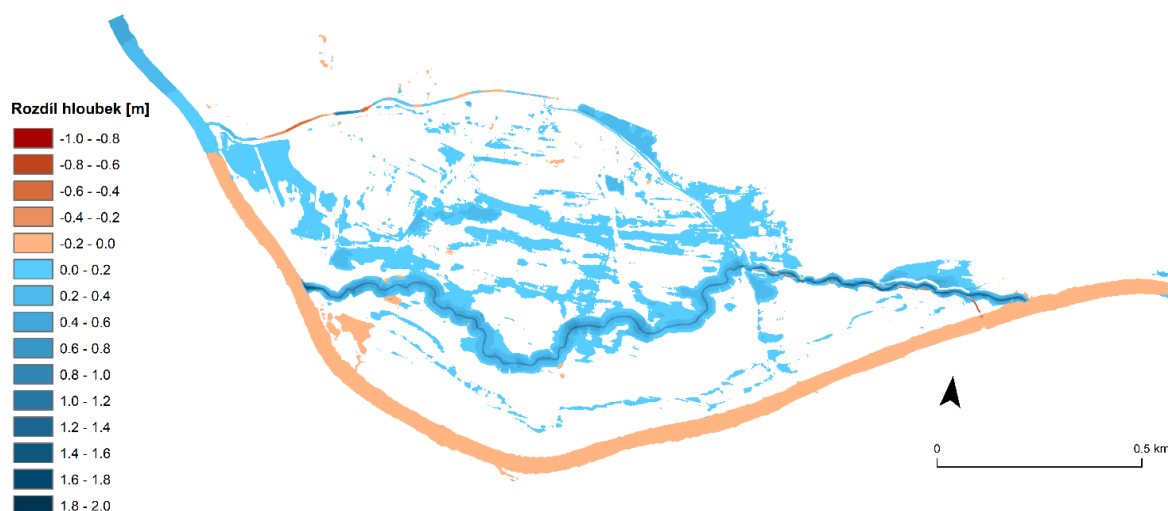
Q [m ³ .s ⁻¹]	Objem zaplavení [10 ³ m ³]				Změna objemu zaplavení [10 ³ m ³]			Změna objemu zaplavení [%]		
	ORIG _{opt}	LUI	LUII	LUIII	LUI	LUII	LUIII	LUI	LUII	LUIII
100	13.14	46.37	51.42	59.01	30.69	35.74	43.33	233	272	330

Pro zhodnocení významnosti vlivu změn revitalizačních opatření, které byly označeny jako prokazatelné, byl zjištěn absolutní i relativní rozdíl od horní hranice intervalu nejistoty. Podle Obr. 5.11 je možné zhodnotit významnost změn revitalizačních úprav pro prokazatelné výsledky.



Obr. 5.11: Prokazatelné absolutní (nahore) a procentuální změny objemů (dole) v zatopeném prostoru říční nivy pro varianty revitalizačních úprav (LU I, LU II, LU III) proti původní situaci (ORIG_{opt}) pro simulovaný průtok 100 m³.s⁻¹ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Jak je z Obr. 5.11 (nahore) patrné, při maximálních zatopených objemech došlo ke zvýšení objemu v říční nivě o cca $4 \cdot 10^3 \text{ m}^3$, což je zvýšení objemu vlivem revitalizačních opatření o necelé 1 % oproti původní situaci (Obr. 5.11 dole). Mnohem výraznější změny jsou pozorovatelné v rozmezí průtoků 40–150 m³.s⁻¹, kde se veškeré hodnoty variantních simulací nachází mimo interval nejistot. Největší změna v objemu zaplaveného prostoru říční nivy vlivem revitalizačních opatření je zaznamenána při průtoku 100 m³.s⁻¹ (Obr. 5.11). Zde dochází ke zvýšení zadržovaných objemů o $30 \cdot 10^3$ až $43 \cdot 10^3 \text{ m}^3$, způsobující navýšení objemu vody v nivě o 233 až 330 % oproti původní situaci (Tab. 5.6).



Obr. 5.12: Prostorové znázornění změn hloubek mezi původní situací a variantou LU III revitalizačních úprav při simulovaném průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy.

K prostorovému odhadu změn objemů v oblasti modelovaného úseku Rožnovské Bečvy bylo využito rozdílů rastrů nadmořských výšek hladin, ze kterých bylo možné usuzovat o nárůstech a poklesech hloubek. Jak je z Obr. 5.12 patrné, dochází v oblasti říční nivy díky přítomnosti nově navrženého koryta k nárůstu hloubek, a to až o 2 m. Tento nárůst je kompenzován poklesem hloubek až o 0.2 m v korytě Rožnovské Bečvy a nemění se až po oblast ústí Úseku II, od kterého dochází k nárůstu hloubek v korytě. Z těchto údajů je možné usuzovat o zvýšeném množství převáděných průtoků Úsekem II a zvýšeném množství zadržených objemů v oblasti říční nivy. Detailnější zobrazení viz Příloha č. 4.1..

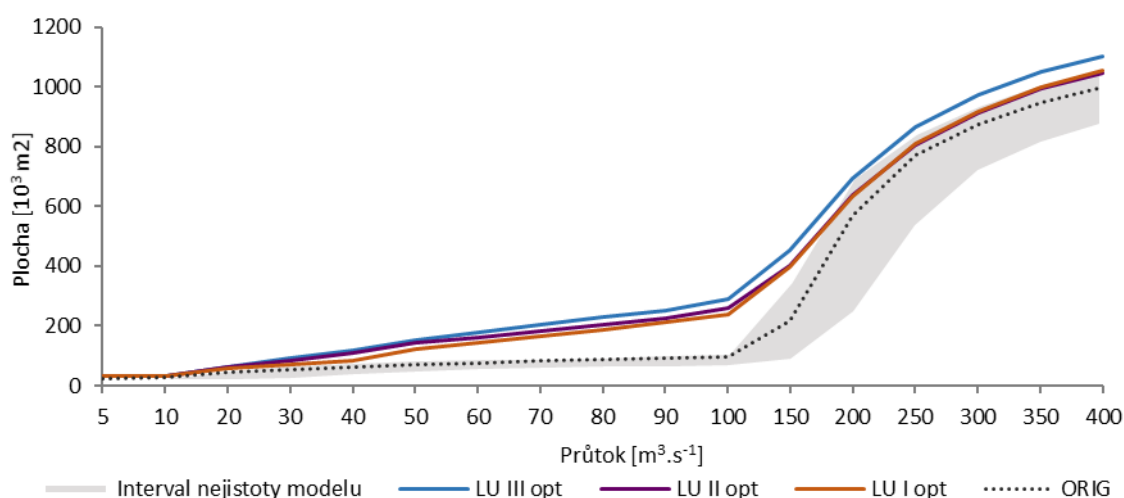
5.2.2. Analýza změn plochy rozlivů

Hodnocení vlivu revitalizačních opatření na změnu rozsahu zaplavení v modelovaném území bylo stejně jako u hodnocení objemů provedeno na sadě 17 řad hypotetických průtoků. Z Obr. 5.13 je patrné podobné rozložení hodnot zaplavených ploch, jako tomu bylo u objemů zaplavených prostor říční nivy. S rostoucí hodnotou průtoků tak dochází ke zvyšování zaplavených ploch, jehož maximální hodnota byla dosažena při maximálním simulovaném průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Tab. 5.7).

Tab. 5.7: Maximální dosažené hodnoty plochy zatopeného prostoru říční nivy pro jednotlivé varianty simulací při simulovaném průtoku v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	Maximální hodnoty zatopených ploch prostoru říční nivy [10^3 m^2]			
	ORIG _{opt}	LU I	LU II	LU III
400	1001.14	1052.97	1045.09	1103.41

Pro původní stav bez revitalizačních úprav činí maximální hodnota zaplavené plochy 1001.10^3 m^2 . Maximální plocha zaplavení vlivem revitalizačních opatření dosáhla hodnoty 1103.10^3 m^2 pro variantu LU III, což obdobně jako u hodnot objemů představuje jen nevýrazné navýšení o 10 % proti původní situaci. U varianty LU III se zároveň jedná o jedinou ze tří variant revitalizačních úprav s prokazatelným efektem na změnu rozsahu maximálních hodnot zaplavených ploch (Obr. 5.13).

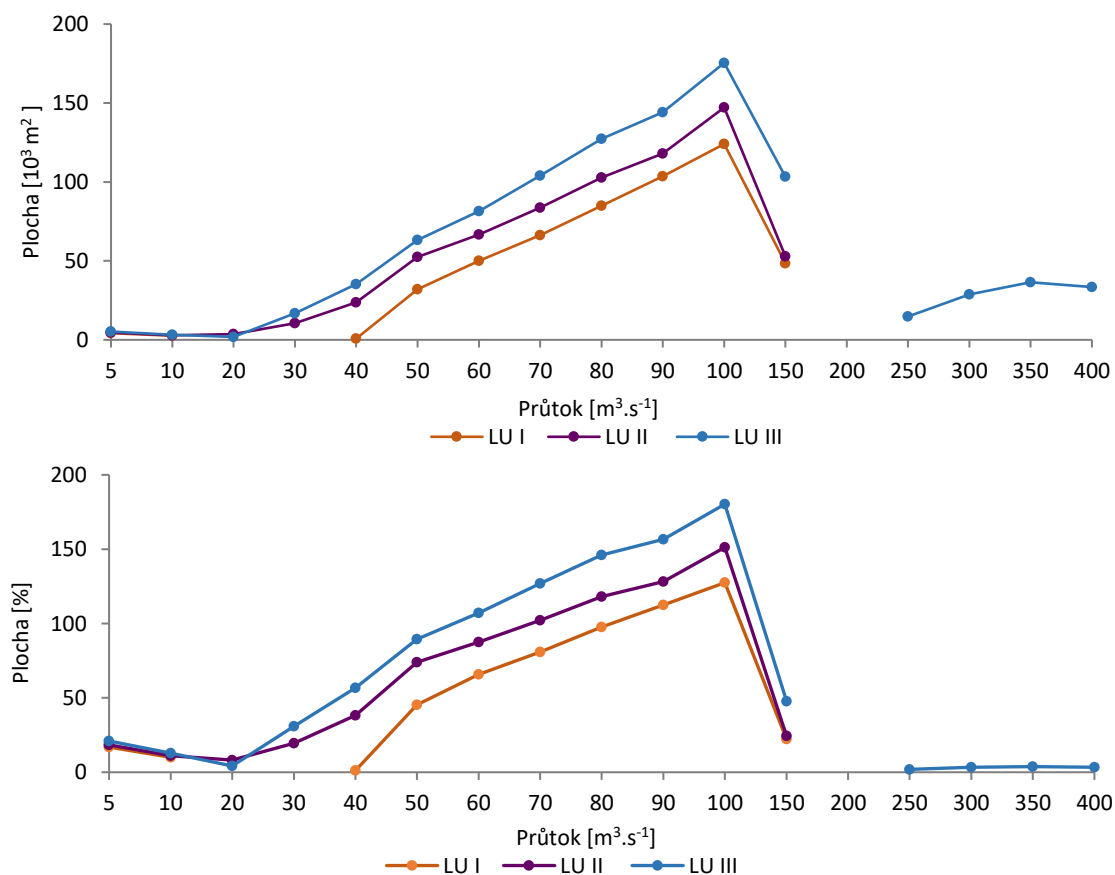


Obr. 5.13: Rozložení hodnot plochy zatopeného prostoru říční nivy v závislosti na hodnotách průtoků pro simulaci původní situace (ORIG_{opt}) a simulace návrhů revitalizačních úprav (LU I, LU II, LU III) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Stejně jako tomu bylo u analýzy objemů zadržených v říční nivě, je také při analýze změn rozsahu zaplavené plochy vlivem revitalizačních opatření nutné hodnotit prokazatelnost výsledků zaplavených ploch vzhledem k intervalu nejistoty modelu. Jak je patrné z Obr. 5.14, významné změny s prokazatelným vlivem jsou pro absolutní (Obr. 5.14, nahoře) i procentuální (Obr. 5.14, dole) změny soustředěny mezi hodnotami průtoků 5–150 m³.s⁻¹ s nejvýznamnější změnou při průtocích 100 m³.s⁻¹.

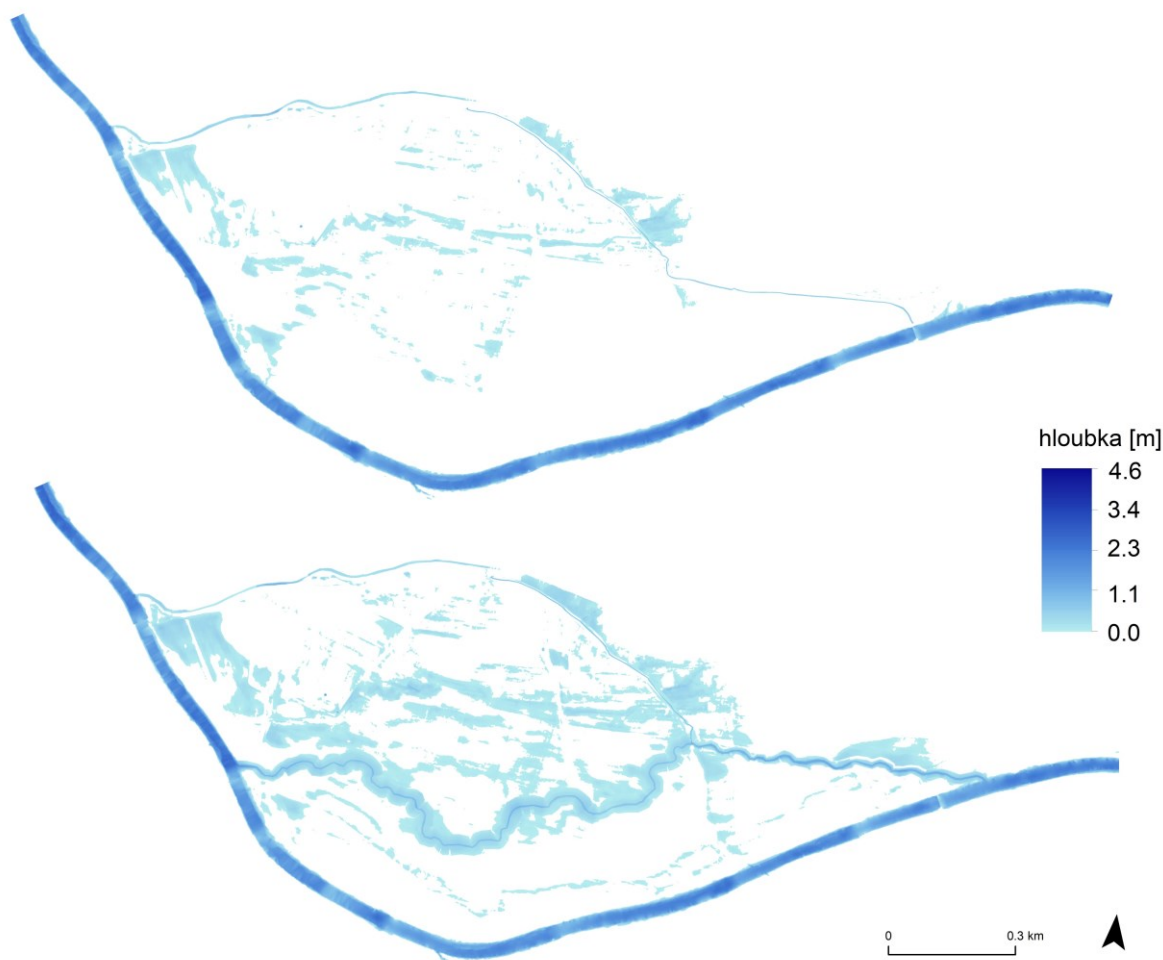
Tab. 5.8: Největší prokazatelné změny ploch zatopeného prostoru říční nivy pro jednotlivé simulace revitalizačních opatření při simulovaném průtoku 100 m³.s⁻¹ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Q [m ³ .s ⁻¹]	Plocha zaplavení [10 ³ m ²]				Změna plochy zaplavení [10 ³ m ²]			Změna plochy zaplavení [%]		
	ORIG _{opt}	LU I	LU II	LU III	LU I	LU II	LU III	LU I	LU II	LU III
100	97.30	238.02	261.12	289.38	124.06	147.17	175.43	128	151	180



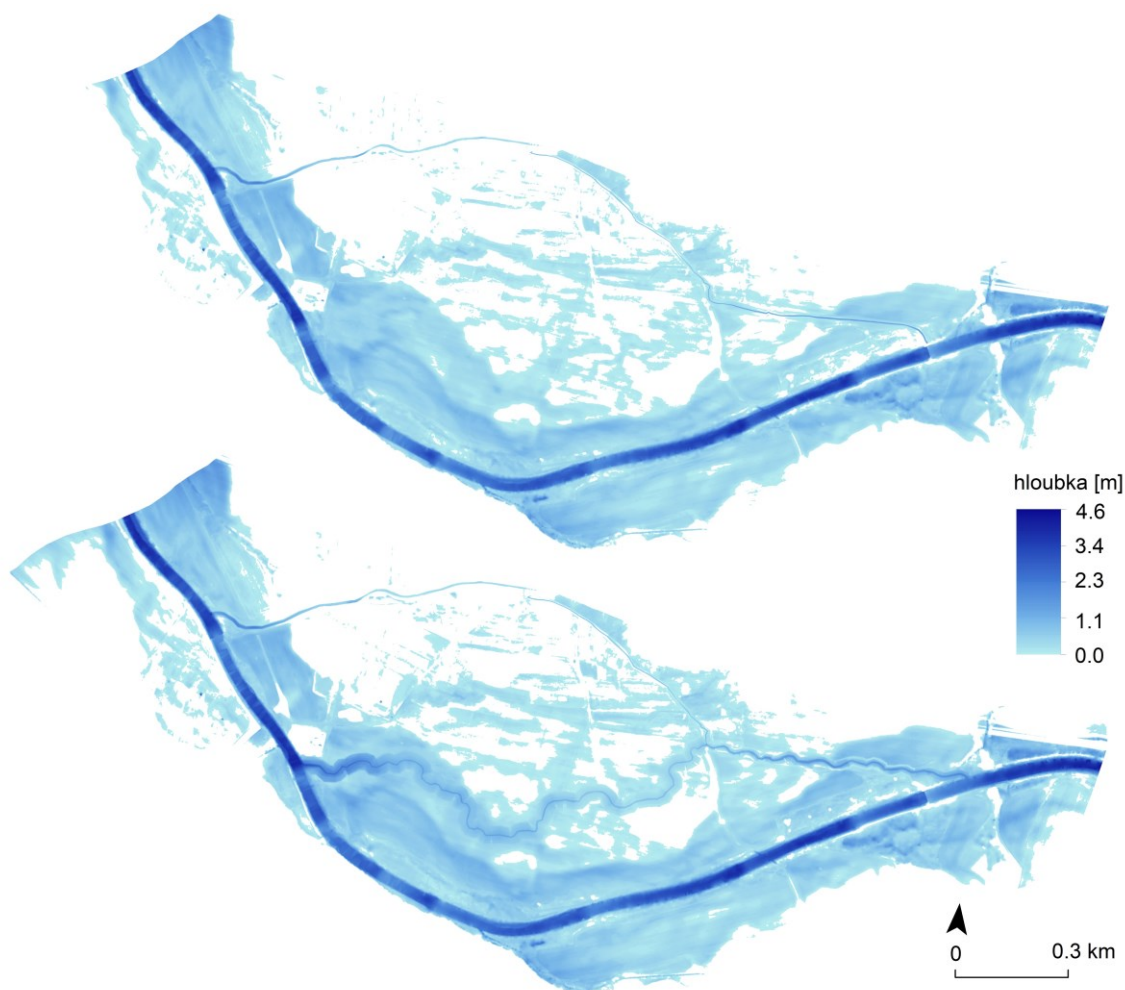
Obr. 5.14: Prokazatelné absolutní (nahoře) a procentuální změny (dole) v rozsahu zatopené plochy v prostoru říční nivy variant revitalizačních úprav (LU I, LU II, LU III) proti původní situaci (ORIG_{opt}) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Nejvyšší nárůst v rozsahu plochy je pozorován u třetí varianty simulace revitalizačních opatření LU III (Obr. 5.14). Tento fakt poukazuje na zvětšování plochy záplavy s rostoucí drsností povrchu. Výsledná změna zatopené plochy v říční nivě činí nárůst o 1751.10³ m², což představuje 180% nárůst zaplavené plochy oproti původní situaci (Tab. 5.8).



Obr. 5.15: Výsledky rozsahu plochy zaplavení pro simulaci průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ původní situace (nahore) a varianty LU III revitalizačních úprav (dole) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

To, že je dosaženo největší změny v rozsahu zaplavení při průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, je možné přisuzovat stavu, kdy již dochází k vybřežení z nově navrženého koryta, avšak ještě nedochází k inundaci z hlavního koryta Rožnovské Bečvy. Tato situace je demonstrována na Obr. 5.15, kde jsou porovnány situace rozsahu zaplavených ploch při průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro původní situaci (Obr. 5.15, nahore) a pro variantu revitalizačního návrhu LU III (Obr. 5.15, dole). Detailnější zobrazení výstupů simulací rozsahu záplav a hloubek při průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro všechny varianty návrhu včetně původní situace jsou zobrazeny v Příloze č. 4.2.1. až 4.2.4..

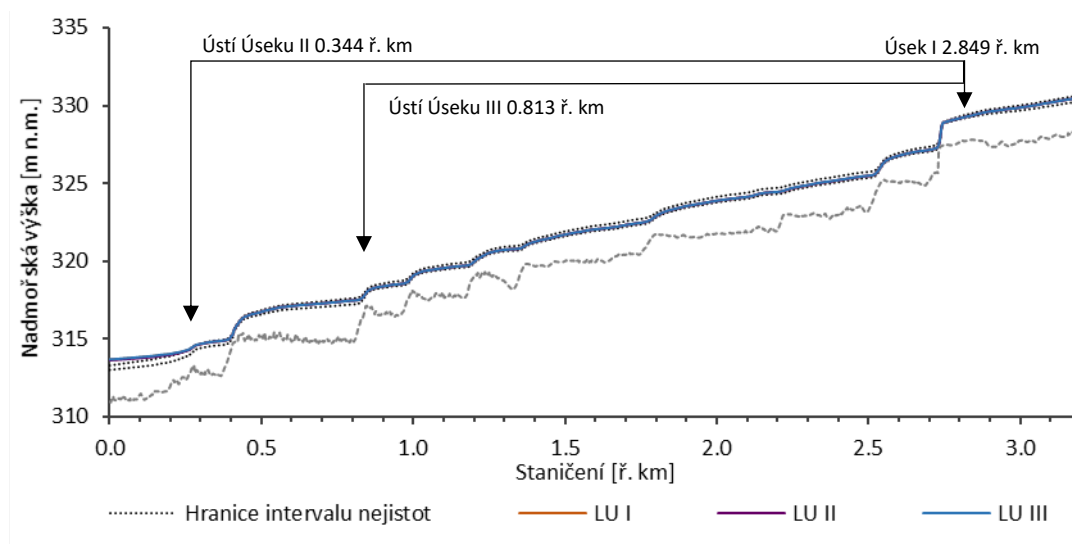


Obr. 5.16: Výsledky rozsahu plochy zaplavení pro simulaci průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ původní situace (nahore) a varianty LU III revitalizačních úprav (dole) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Jak je patrné z Obr. 5.14 (dole), rozdíl v rozsahu zaplavených ploch mezi původní situací a variantou LU III od hodnoty průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ postupně klesá, avšak až do hodnoty $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, odkud začíná rozdíl opět mírně růst. I přes tento růst je při maximální hodnotě simulovaných průtoků ($400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) změna rozlivů oproti původní situaci minimální (nárůst o 10 %), jak je patrné také z Obr. 5.16, kde dochází k rozsáhlému zaplavení říční nivy jak v situaci revitalizačního návrhu LU III (dole), tak při současném stavu (nahore). Detailnější zobrazení výstupů simulací rozsahu záplav a hloubky při průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro všechny varianty návrhu včetně původní situace jsou zobrazeny v Příloze č. 4.3.1. až 4.3.4..

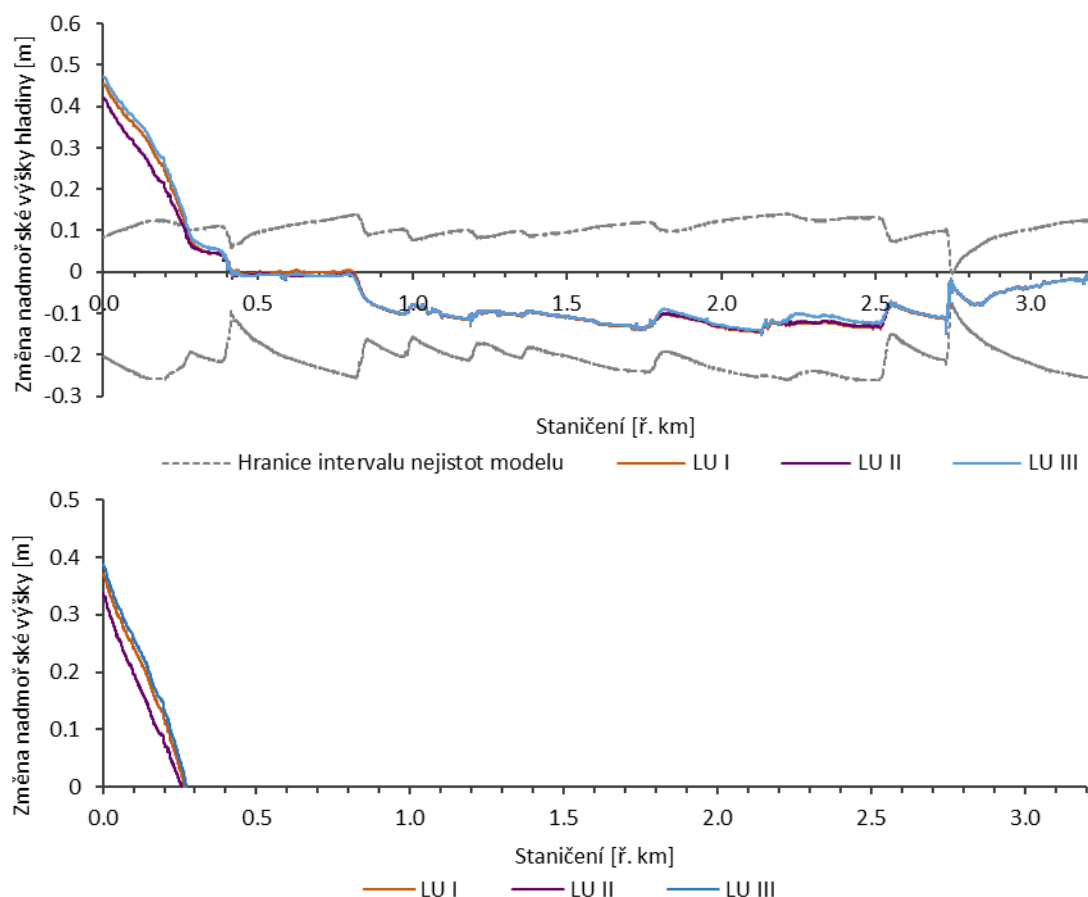
5.2.3. Analýza změn nadmořských výšek hladin

Vzhledem k předchozím výsledkům, které poukázaly na nejvýznamnější prokazatelné změny návrhů revitalizačních úprav při průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ byly pro analýzu změn nadmořských výšek hladin Rožnovské Bečvy v modelovaném úseku, s předpokladem nejvyšších možných rozdílů oproti původní situaci, vybrány výsledky právě ze simulací průtoků $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 5.17: Rozložení simulovaných nadmořských výšek hladin v korytě Rožnovské Bečvy při průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Z Obr. 5.17 je patrné, že podél celého modelovaného úseku koryta nedochází v poloze hladin oproti původní situaci k výraznějším změnám. Jasnější vyobrazení simulovaných výsledků polohy hladin po aplikaci revitalizačních opatření je blíže patrné z Obr. 5.18 (nahore), kde jsou znázorněny absolutní rozdíly simulovaných hladin v porovnání s původní situací.



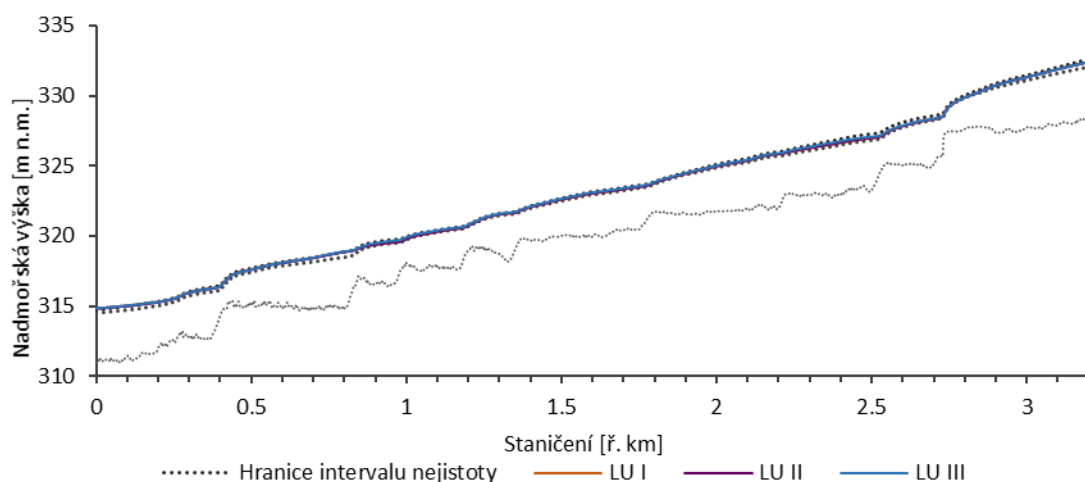
Obr. 5.18: Absolutní rozdíly výsledků simulací nadmořských výšek hladin v korytě Rožnovské Bečvy pro návrhy revitalizačních opatření (LU I, LU II, LU III) od výsledků původní situace při simulovaném průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (nahore). Prokazatelné absolutní změny v poloze nadmořských výšek hladin v korytě Rožnovské Bečvy pro návrhy revitalizačních opatření (LU I, LU II, LU III) při průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (dole) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy.

Na Obr. 5.18 (nahore) je patrný mírný pokles v hladinách od cca 2,800 ř. km modelovaného úseku, který se přibližuje zpět k hodnotám polohy hladiny původní situace na 0,800 ř. km. Od cca 0,400 ř. km modelovaného úseku začínají hodnoty hladin narůstat až k závěrovému profilu. Převážná část hodnot podél modelovaného úseku se však nachází uvnitř intervalu nejistot, a proto jejich odchylky od polohy hladiny původní situace nelze považovat za prokazatelné. Po započítání nejistot modelu do výsledků simulací, včetně vlivu dolní okrajové podmínky, která může ovlivňovat výsledky až do vzdálenosti 120 m od 0,000 ř. km, je možné změny v poloze hladin považovat za prokazatelné od 0,300 ř. km modelovaného úseku až po jeho 0,120 ř. km (Obr. 5.18, dole).

Tab. 5.9: Nejvýznamnější prokazatelné změny výšek hladin v korytě Rožnovské Bečvy pro jednotlivé simulace revitalizačních opatření při průtocích $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

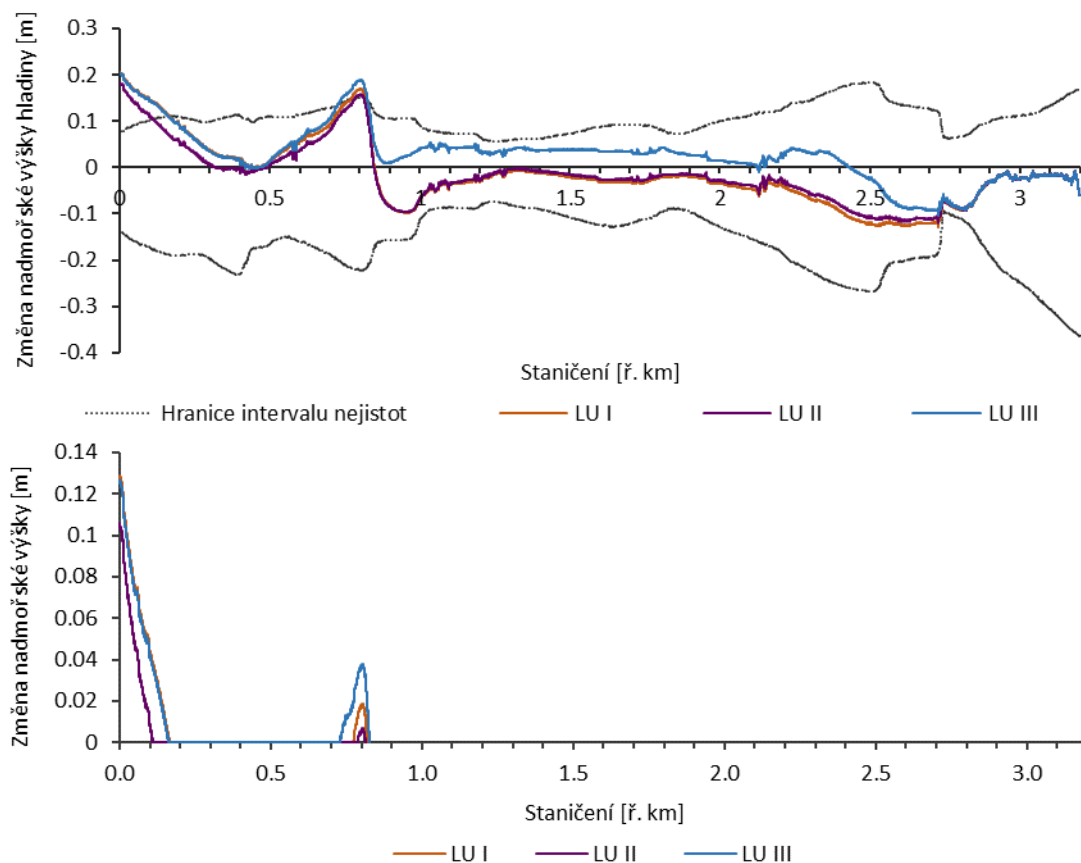
Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	ř. km	Nadmořská výška hladin [m n. m.]				Změna výšky hladin [m]		
		ORIG _{opt}	LU I	LU II	LU III	LU I	LU II	LU III
100	0.120	313.54	313.87	313.82	313.89	0.21	0.16	0.23
	0.120	314.98	315.11	315.07	315.11	0.03	-	0.02
400	0.807	318.71	318.88	318.87	318.90	0.02	0.01	0.04

K maximální změně oproti původní situaci dochází při simulovaném průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na 0,120 ř. km modelovaného úseku, která však činí nárůst pouze o 0,23 m pro variantu simulace LU III (Tab. 5.9), což je možné také sledovat na Obr. 5.12 popisující změnu hloubek v modelovaném úseku. Příčiny nárůstu výšky hladiny je možné usuzovat z polohy 0,120 ř. km, kde k nárůstu dochází, a který následuje za ústím Úseku II do Rožnovské Bečvy. Zvýšení průtočné kapacity nově navrženého Úseku I tak pravděpodobně vedlo ke zvýšení průtoků, které Úsek II převádí, a tedy i ke zvýšení hladin za jeho ústím.



Obr. 5.19: Rozložení simulovaných nadmořských výšek hladin v korytě Rožnovské Bečvy při průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Pro zhodnocení možných změn při největší ploše rozlivu byly analyzovány také výsledky simulací za průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Jak je patrné z Obr. 5.19, výsledné hladiny simulací revitalizačních opatření sledují podobné hodnoty, kterých dosáhly výsledky simulace hladin původní situace, od které se jen minimálně odlišují.



Obr. 5.20: Absolutní rozdíly výsledků simulací nadmořských výšek hladin v korytě Rožnovské Bečvy pro návrhy revitalizačních opatření (LU I, LU II, LU III) od výsledků původní situace při simulovaném průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (nahore). Prokazatelné absolutní změny v poloze nadmořských výšek hladin v korytě Rožnovské Bečvy pro návrhy revitalizačních opatření (LU I, LU II, LU III) při průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (dole) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy.

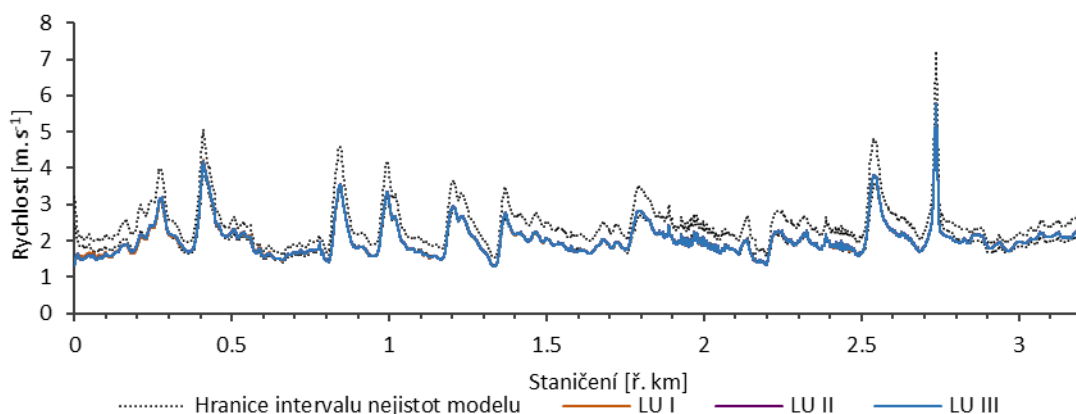
Detailnější zobrazení změn hladin podél modelovaného území při průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ je zobrazeno v Obr. 5.20 (nahore) s absolutními rozdíly mezi výsledky simulací revitalizačních úprav a výsledky původní situace. Z Obr. 5.20 (dole) jsou patrné jen mírné odchylky od výsledků původní situace. Od 2,400 ř. km modelovaného úseku poukazují výsledky simulací revitalizačních návrhů LU I a LU II na pokles hladin proti původní situaci, kdežto výsledky revitalizačního návrhu LU III ukazují na jejich vzrůst. Výraznější nárůst je patrný na 0,807 ř. km, od kterého hladiny opět klesají, ale neklesají pod hladinu původní situace. Druhý výrazný vzestup nastává od 0,400 ř. km až po závěrový profil, kde nárůst oproti původní situaci dosahuje svého maxima. Z výše uvedených pozorování bylo možné určit prokazatelné změny ve výšce hladin, které byly lokalizovány na 0,807 ř. km a 0,120 ř. km modelovaného území (Obr. 5.20, dole). Obě změny jsou však minimální a jedná se pouze o jednotky centimetrů (Tab. 5.9). Na 0,807 ř. km byl zaznamenán nejvýznamnější prokazatelný nárůst ve výšce hladin o 0,04 m pro variantu LU III, na 0,120 ř. km došlo k nárůstu oproti původní situaci o 0,03 m pro variantu LU I (Tab. 5.9) Vzhledem k malým odchylkám od původní situace lze jen těžko usuzovat na odlišný vliv variant revitalizačních opatření. Na základě shody prokazatelných výsledků vzestupu hladiny na 0,807 ř. km modelovaného úseku se staničením ústí Úseku III (Obr. 5.17) lze však usuzovat na výraznější vliv nově navrženého koryta na výšku hladiny v korytě Rožnovské Bečvy s rostoucími průtoky.

5.2.4. Analýza změn rychlostí proudění v korytě

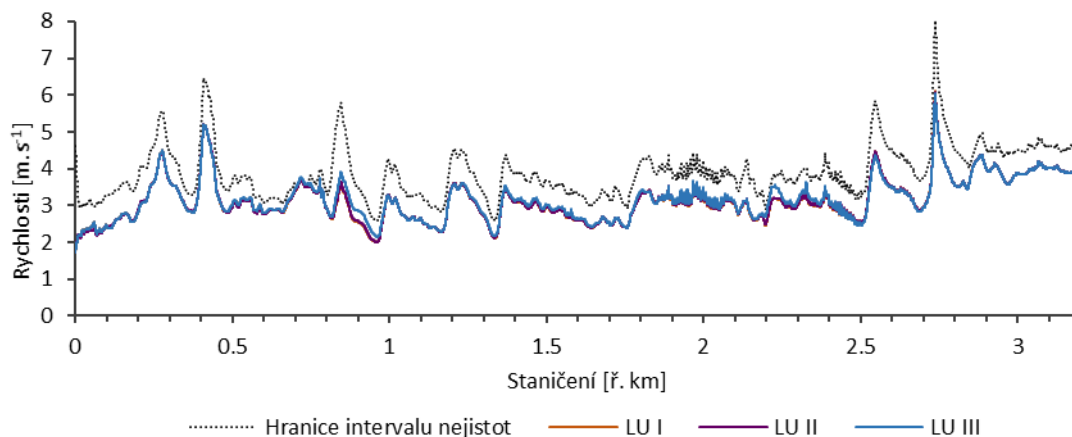
Tak jako u změn nadmořských výšek hladin v korytě byly i pro analýzu změn rychlostí proudění v korytě Rožnovské Bečvy vybrány výsledky simulací průtoků $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Rozložení rychlostí v korytě pro oba simulované průtoky jsou zobrazeny na Obr. 5.21 a Obr. 5.22. Zde jsou patrná lokální zvýšení rychlostí převážně v místech stupňů v korytě, jako jsou jezy či přírodní stupně. Mezi oběma simulacemi rychlostí proudění je také patrný výraznější pokles rychlostí jednotlivých variant revitalizačních úprav oproti původní situaci při simulaci průtoků $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Obr. 5.22), než je tomu u simulace při průtocích $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Obr. 5.21), jak je patrné také z Tab. 5.10.

Tab. 5.10: Nejvýznamnější prokazatelné změny rychlostí proudění v korytě Rožnovské Bečvy pro simulace průtoků $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy.

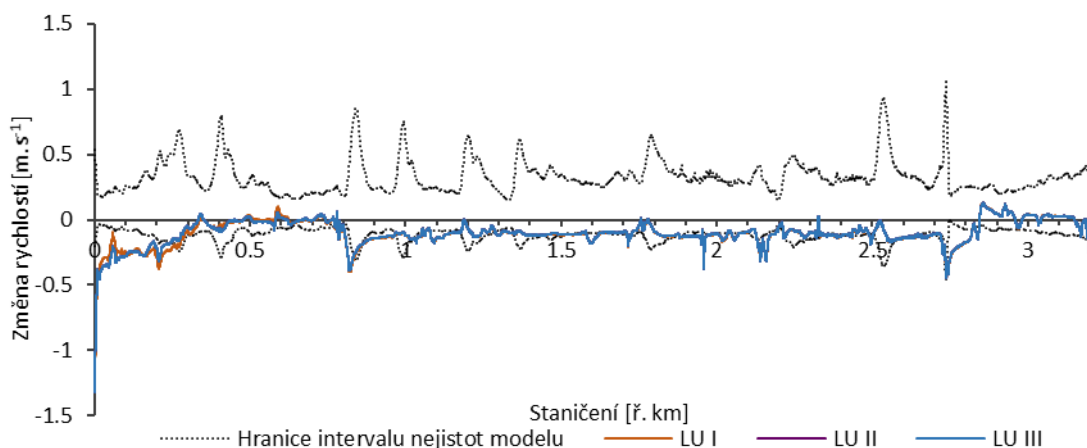
Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	ř. km	Rychlost $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$				Změna rychlostí $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$			Změna rychlostí %		
		ORIG _{opt}	LU I	LU II	LU III	LU I	LU II	LU III	LU I	LU II	LU III
100	1.958	2.28	1.90	1.90	1.90	-0.28	-0.28	-0.28	-12	-12	-12
	3.196	3.69	2.98	2.98	2.98	-0.56	-0.56	-0.56	-15	-15	-15
400	0.828	3.61	2.73	2.75	2.86	-0.52	-0.50	-0.39	-14	-14	-10



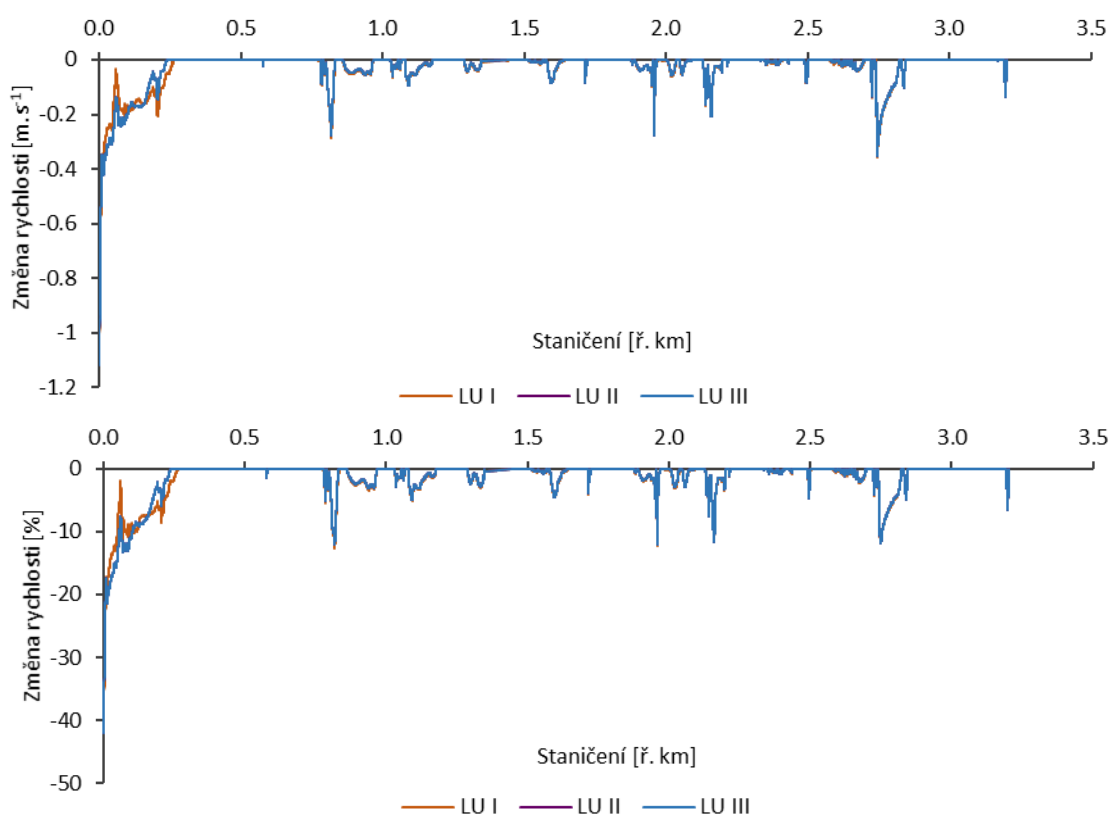
Obr. 5.22: Rozložení simulovaných rychlostí proudění v korytě Rožnovské Bečvy při průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy



Obr. 5.21: Rozložení simulovaných rychlostí proudění v korytě Rožnovské Bečvy při průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy



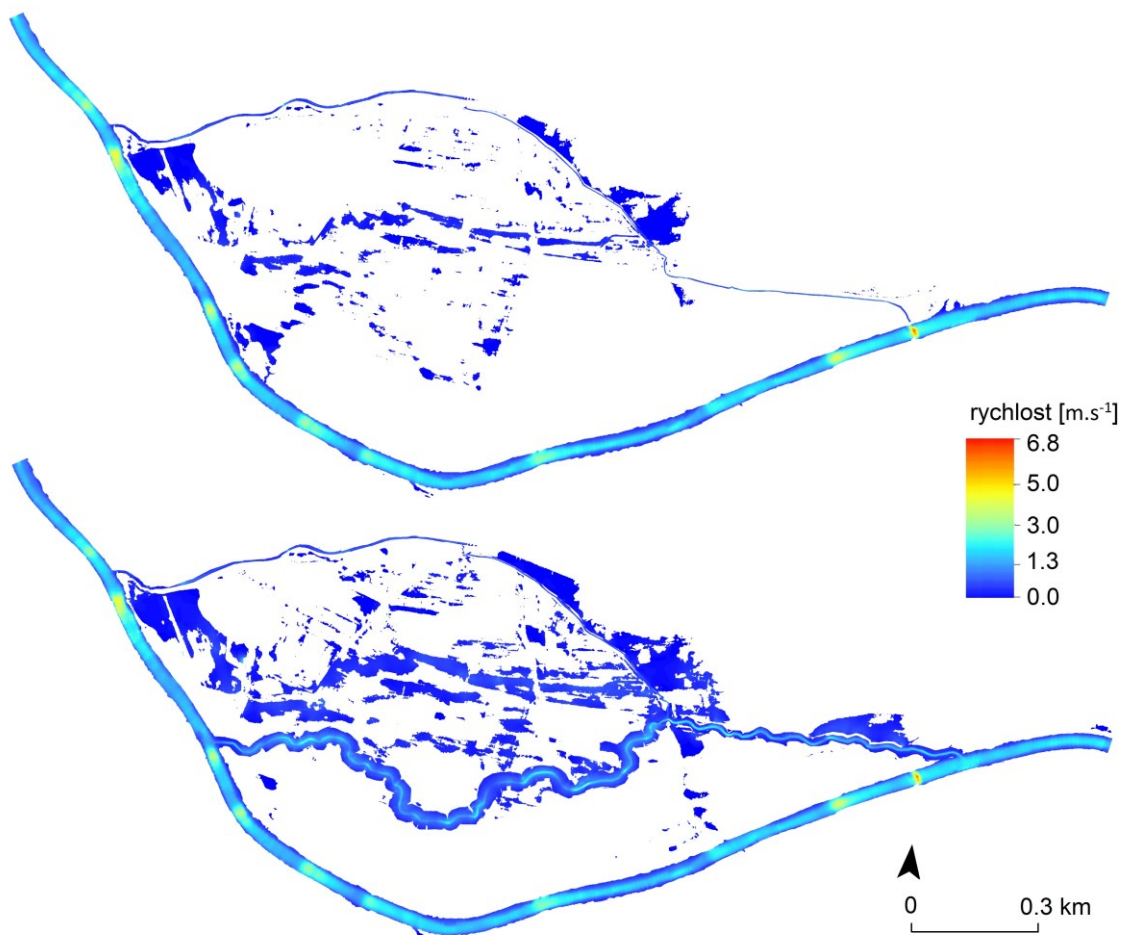
Obr. 5.23: Absolutní rozdíly výsledků simulací rychlostí proudění v korytě Rožnovské Bečvy pro návrhy revitalizačních opatření od výsledků původní situace při průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy



Obr. 5.24: Prokazatelné absolutní (nahore) a procentuální změny (dole) rychlostí proudění v korytě Rožnovské Bečvy variant revitalizačních opatření úprav proti původní situaci při simulovaném průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy.

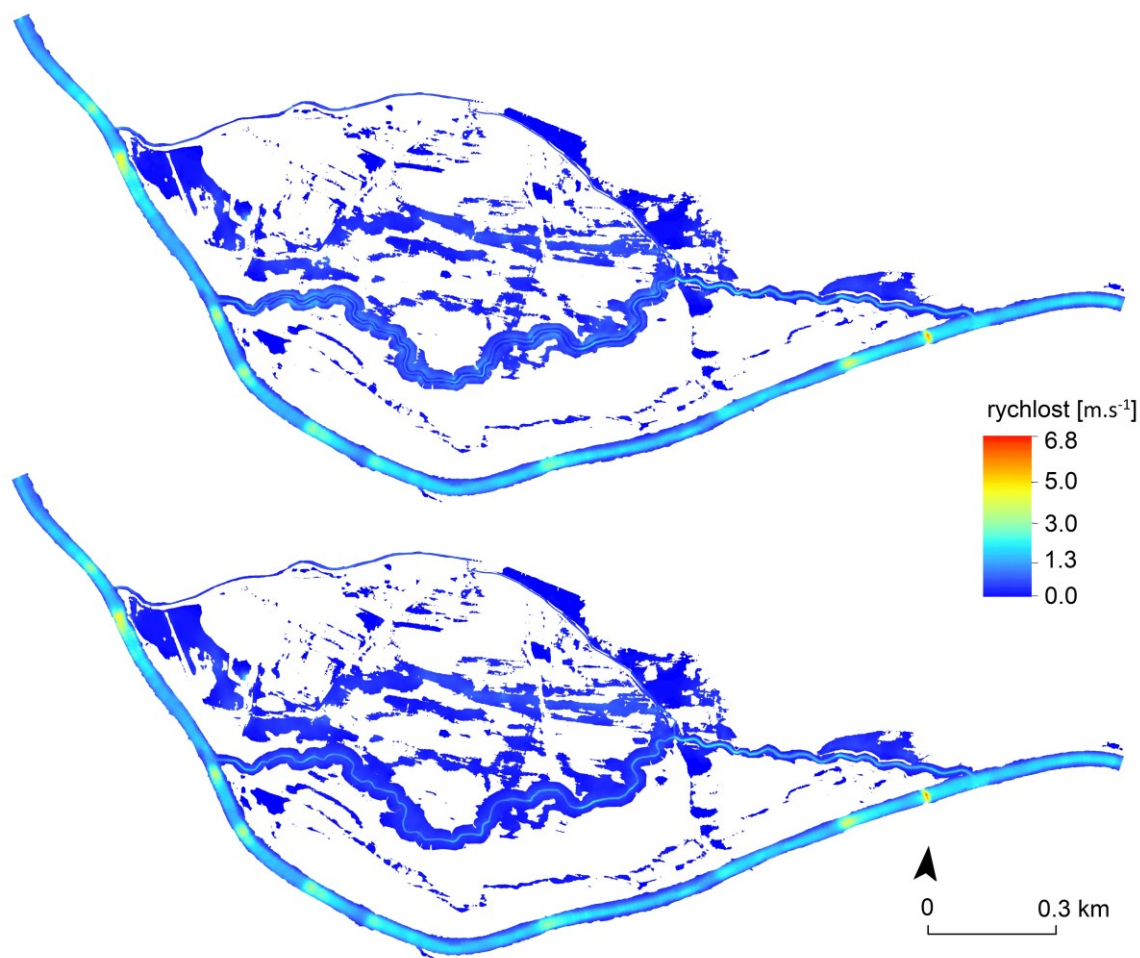
Jak je z Obr. 5.24 (nahore) i Obr. 5.24 (dole) patrné, jako prokazatelné změny se jeví pouze poklesy rychlostí proudění. K prokazatelnému poklesu rychlostí proudění došlo na řadě míst, avšak tak jako tomu bylo u změn hladin nadmořských výšek, také změny rychlostí proudění dosahují jen nízkých hodnot a ani z vizuálních výstupů simulací nejsou změny patrné (Obr. 5.25).

Největší změny bylo nicméně dosaženo v profilu na 1,958 ř. km modelovaného úseku (Obr. 5.24). Zde byl zaznamenán pokles rychlostí o $0,26 \text{ m.s}^{-1}$, což činí pokles rychlosti proudění o 12 % proti původní situaci pro všechny varianty simulací LU I – LU III (Tab. 5.10). Změny v závěrové části úseku byly vzhledem k možnému vlivu okrajové podmínky zanedbány až do vzdálenosti 120 m od závěrového profilu. Obdobné poklesy rychlostí, které byly zjištěny na 1,958 ř. km, jsou patrné ještě na řadě míst. Jedná se o profily na 0,818 ř. km, 2,152 ř. km, 2,746 ř. km (Obr. 5.24).



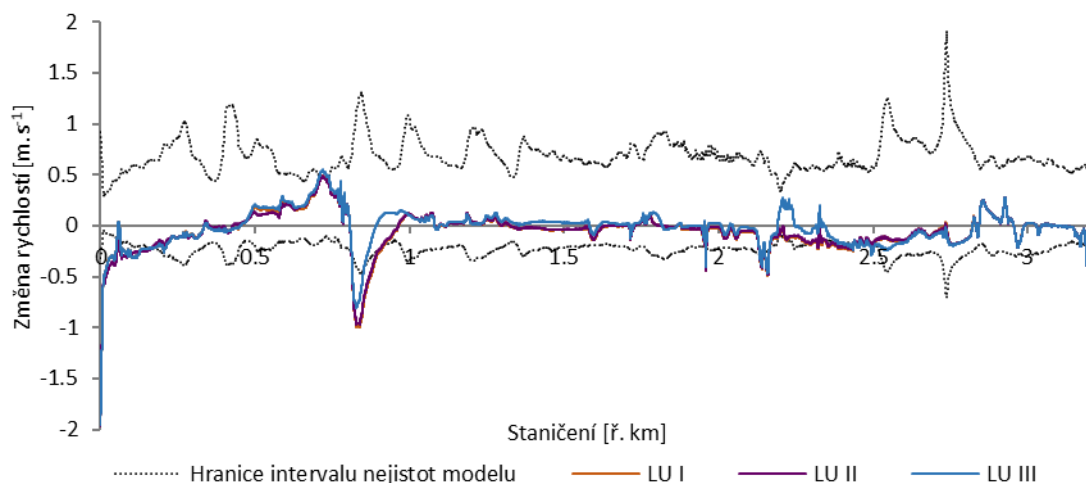
Obr. 5.25: Výsledky simulace rychlosti proudění při průtoku $100 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ pro původní situace (nahore) a pro variantu revitalizační úpravy LU I (dole) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Odůvodnění poklesů rychlostí právě v těchto profilech však není zcela jednoznačné, a to převážně u profilu s největším poklesem rychlostí, kde nedošlo k žádné změně geometrie či drsnostního parametru, ani se zde nenachází žádná terénní překážka. Profily na 2,152 a 2,745 ř. km se nacházejí v blízkosti jezů, které mohly změny rychlostí proudění ovlivnit. V profilu 0,818 ř. km se nachází ústí Úseku III, kde byly identifikovány také prokazatelné vzrůst nadmořské výšky hladiny. Je možné se tak domnívat, že tento fakt vedl ke zvýšení omočeného obvodu, a tedy i většímu vlivu drsnosti koryta na rychlosti proudění a jeho následnému poklesu. Obdobné závěry je možné vytvořit také pro závěrovou oblast úseku, kde pokles rychlosti proudění může být ovlivněn nárůstem hladiny.

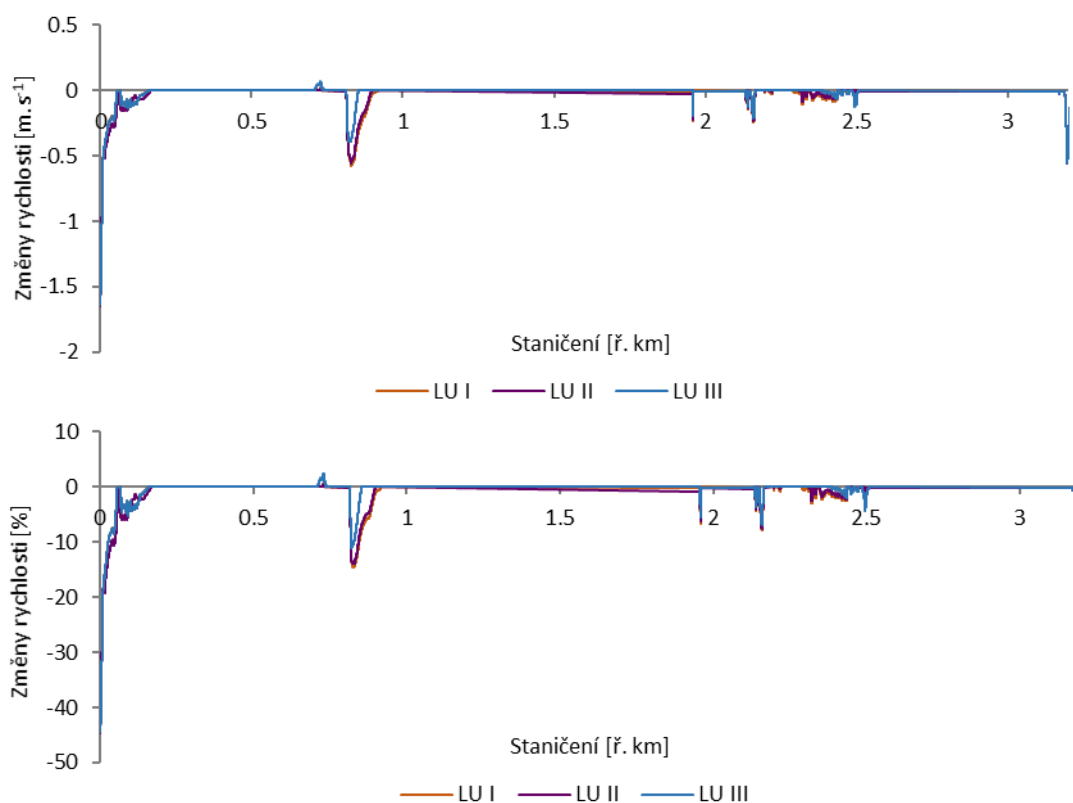


Obr. 5.25: (pokračování) Výsledky simulace rychlosti proudění při průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro variantu revitalizační úpravy LU II (nahore) a LU III (dole) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

I přesto, že varianty revitalizací rychlosti proudění v korytě Rožnovské Bečvy nijak významně neovlivnily, k jistým změnám došlo v prostoru říční nivy mezi variantami revitalizačních návrhů navzájem (Obr. 5.25). U varianty LU II (Obr. 5.25, pokračování, nahore) je patrný vliv vrbového porostu lemující nové koryto na pokles rychlostí v jeho příbřežní zóně. U varianty LU III (Obr. 5.25, pokračování, dole) je patrný pokles rychlostí v celém zaplaveném prostoru vlivem lesního porostu doprovázející koryto v širokém pásu o celého jeho délce. Rychlosti proudění pro všechny varianty simulací při průtocích $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ zobrazeny v Příloze 4.4.1. až 4.4.4..



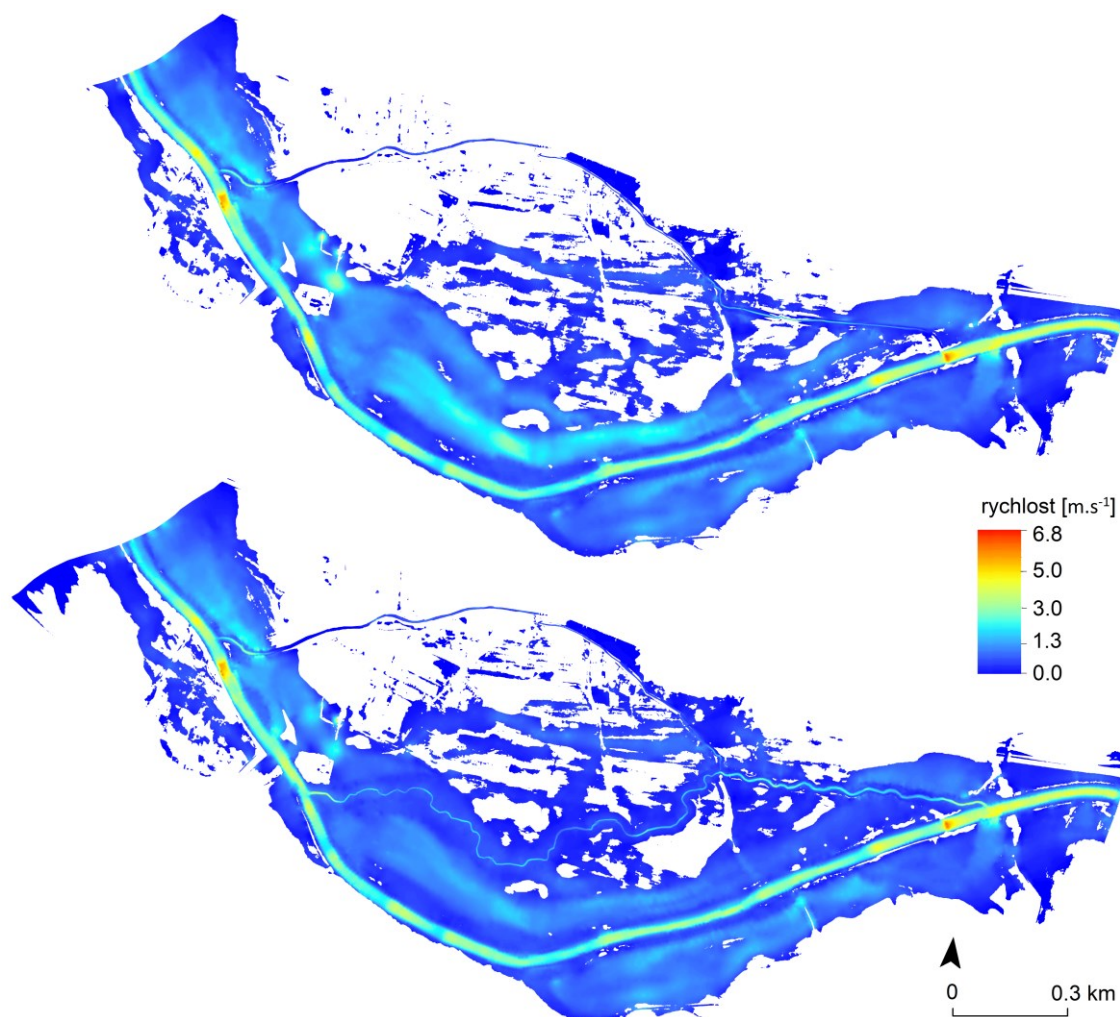
Obr. 5.26: Absolutní rozdíly výsledků simulací rychlostí proudění v korytě Rožnovské Bečvy pro návrhy revitalizačních opatření od výsledků původní situace při průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy



Obr. 5.27: Prokazatelné absolutní (nahore) a procentuální změny (dole) rychlostí proudění v korytě Rožnovské Bečvy revitalizačních úprav (LU I, LU II, LU III) proti původní situaci (ORIG_{opt}) pro simulovaný průtok $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy.

Hodnocením výsledků simulací při průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bylo zjištěno obdobné rozložení změn rychlostí jako při simulaci průtoků $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Obr. 5.26). Jak je však patrné z Obr. 5.27, prokazatelné změny nejsou již tak časté, zato jejich hodnoty jsou vyšší (Tab. 5.10), což je pravděpodobně způsobeno větší kontaktní plochou v oblasti říční nivy během rozlivů.

Nejvýznamnější prokazatelná změna byla identifikována na 3,196 ř. km, kde pokles rychlostí činí 15 % (o $0,56 \text{ m.s}^{-1}$) pro všechny varianty revitalizačních úprav (Tab. 5.10). Druhým významným místem je profil na 0,828 ř. km (Obr. 5.27), kde pokles činí 14 % (o $0,52 \text{ m.s}^{-1}$) oproti původní situaci (Tab. 5.10) a kde je možné usuzovat o vlivu přítoku z nově navrženého koryta v Úseku III. Změny v rychlostech proudění v závěrové oblasti neovlivněné dolní okrajovou podmínkou dosahují poklesu rychlostí maximálně o 2 %.

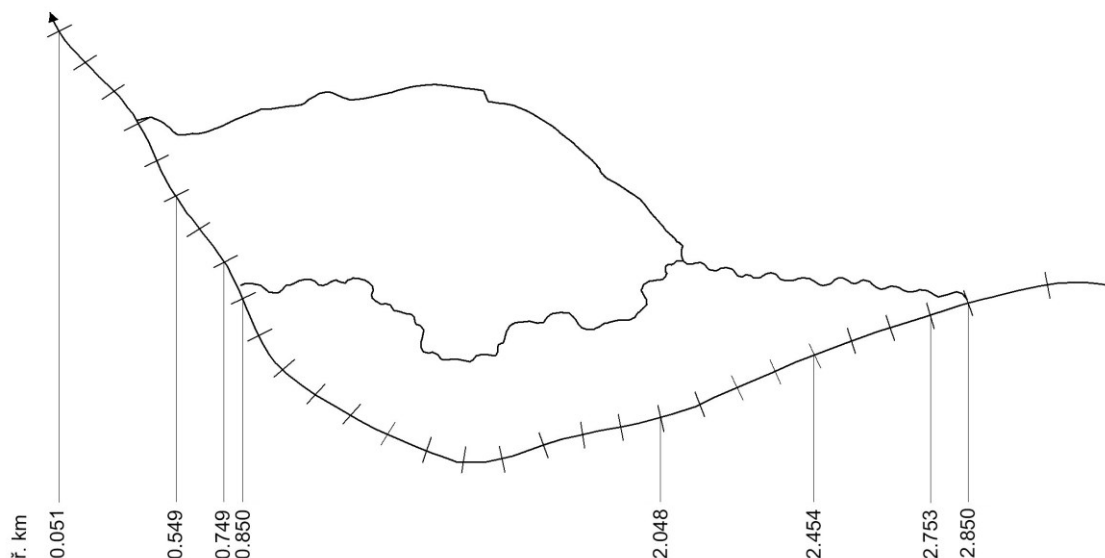


Obr. 5.28: Rychlosti proudění při simulaci průtoků $400 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ pro variantu původní situace (nahore) a variantu revitalizačních prav LU III (dole) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Po vizuálním zhodnocení rychlostí proudění v prostoru říční nivy, je možné se domnívat o nejvýraznější změně rychlostí u varianty revitalizace LU III. Z Obr. 5.28 výsledků je patrný pokles rychlostí v říční nivě na pravém břehu Rožnovské Bečvy, kde dochází ke kontaktu s nejvyššími hodnotami drsnosti povrchu, a tedy i nejvýraznějšímu poklesu rychlostí, který činí pokles z $2,9 \text{ m.s}^{-1}$ na $1,8 \text{ m.s}^{-1}$, tedy o 38 %. Rychlosti proudění pro všechny varianty simulací při průtocích $400 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ jsou zobrazeny v Příloze 4.5.1. až 4.5.4..

5.2.5. Analýza změn kulminačních průtoků

Pro demonstraci transformačního efektu revitalizačních opatření na kulminační průtoky v korytě Rožnovské Bečvy byly vybrány dvě povodňové situace o různých N-letostech, a to z roku 1997 (Q_{100}) a z roku 2007 (Q_5), které odpovídají výsledkům simulací hypotetických průtoků $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Kulminace pro Q_{100} nastala v modelovaném úseku 7. 7. 1997 ve 02:00 h. Pro událost Q_5 nastala kulminace v modelovaném úseku 7. 9. 2007 ve 13:00 h.



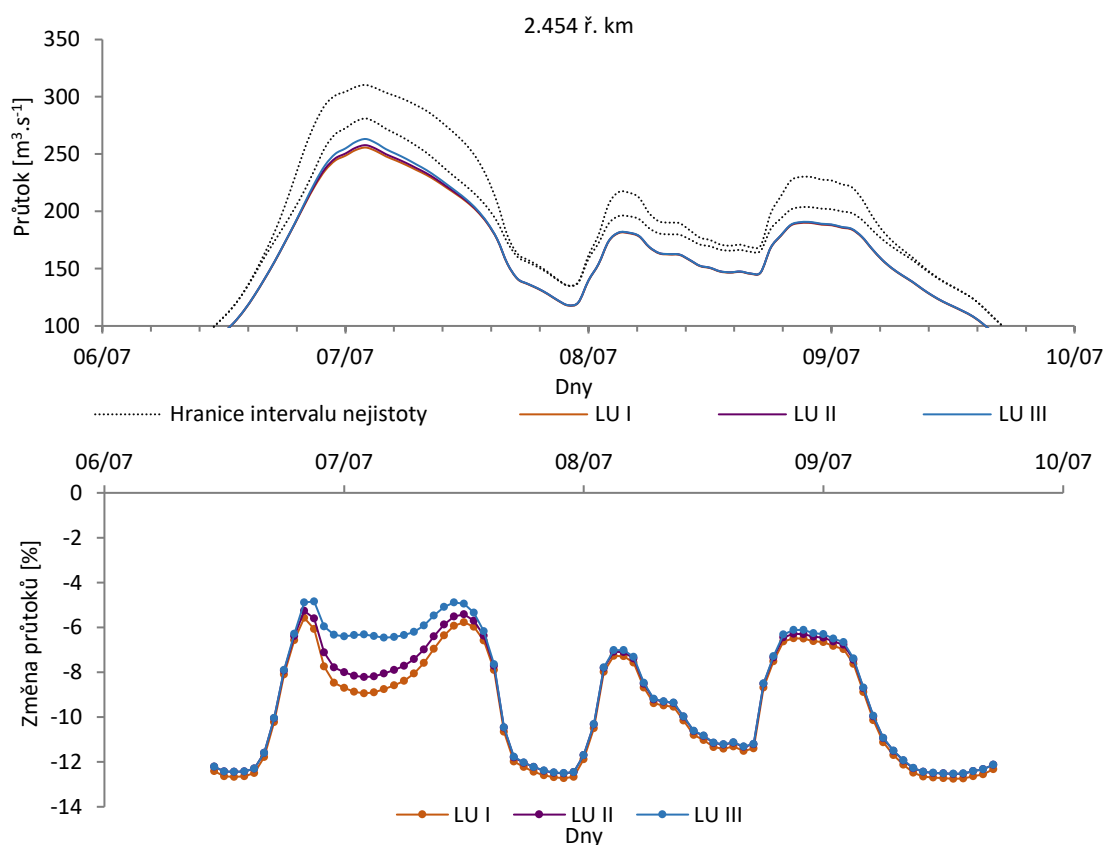
Obr. 5.29: Vybrané profily a jejich staničení pro analýzu změn kulminačních průtoků za využití hydrogramů povodňových situací z let 1997 a 2007 v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Pro každou situaci byly k analýze vybrány profily, ve kterých došlo ke změně kulminačních průtoků simulací revitalizačních opatření oproti simulaci původní situace a ke změně v prokazatelnosti kulminačních průtoků. Celkem tak bylo k analýze pro situaci z roku 1997 vybráno 7 profilů a pro situaci z roku 2007 4 profily. Pro analýzu byl vždy vybrán profil před počátkem úseku s navrženými revitalizačními úpravami na 2,849 ř. km a profil v závěru modelovaného území na 0,051 ř. km. Vybrané profily se staničeními jsou uvedeny na Obr. 5.29. Prokazatelné změny z vybraných profilů byly jak pro situaci z roku 1997, tak z roku 2007 zaznamenány na 3 profilech (Tab. 5.11).

Tab. 5.11: Prokazatelné transformace kulminačních průtoků ve vybraných profilech v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy pro hydrogramy povodní z let 1997 a 2007 (šedě označeny neprokazatelné hodnoty)

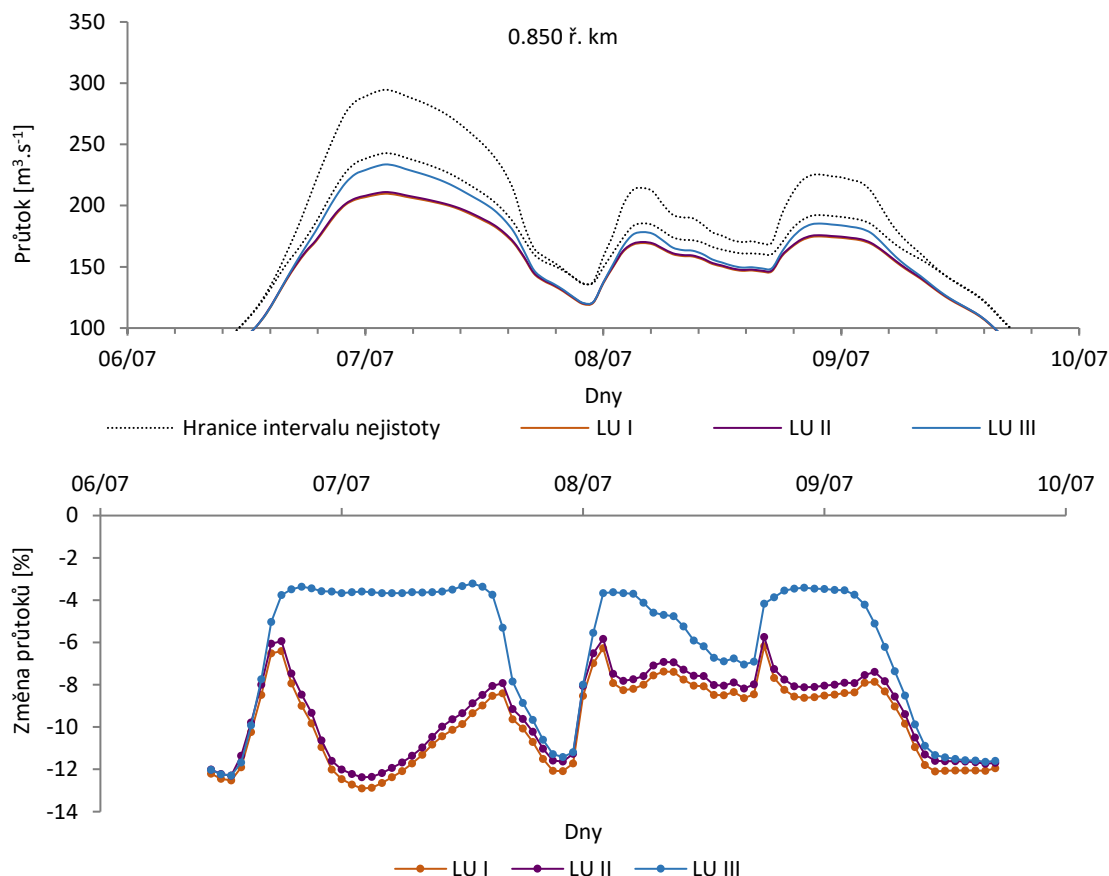
Rok	ř. km	Průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]				Změna průtoků [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]			Změna průtoků [%]		
		ORIG _{opt}	LU I	LU II	LU III	LU I	LU II	LU III	LU I	LU II	LU III
1997	0.051	267.93	236.51	245.88	236.12	-20.13	-10.75	-20.51	-8	-4	-8
	0.549	231.77	242.83	243.11	245.24	11.06	11.35	13.47	5	5	6
	0.749	288.00	331.23	329.59	338.41	18.43	16.79	25.61	6	6	9
	0.850	256.57	209.72	211.09	233.62	-33.11	-31.75	-9.21	-13	-12	-4
	2.048	263.55	255.15	256.63	264.21	-8.40	-6.92	0.67	-3	-3	0
	2.454	283.85	255.70	257.79	263.18	-25.39	-23.30	-17.90	-9	-8	-6
	2.850	312.86	322.32	322.26	322.23	9.46	9.40	9.37	3	3	3
2007	0.051	119.89	117.28	117.09	116.04	-2.15	-2.34	-3.38	-2	-2	-3
	0.749	119.99	117.37	117.19	116.14	-2.16	-2.34	-3.39	-2	-2	-3
	2.753	122.33	105.75	106.02	106.02	-16.42	-16.15	-16.14	-13	-13	-13
	2.850	122.37	122.03	122.03	122.03	-0.24	-0.24	-0.24	-0	-0	-0

Prvním vybraným profilem pro situaci z roku 1997, který byl použit pro analýzu transformace kulminačních průtoků, byl profil na 2,850 ř. km před vtokem od Úseku I. Výsledky simulovaných hydrogramů zde poukazují na nárůst kulminačních průtoků o 3 % (Tab. 5.11). Vzhledem k tomu, že výsledky spadají do intervalu nejistot, tak je nebylo možné označit za prokazatelné.



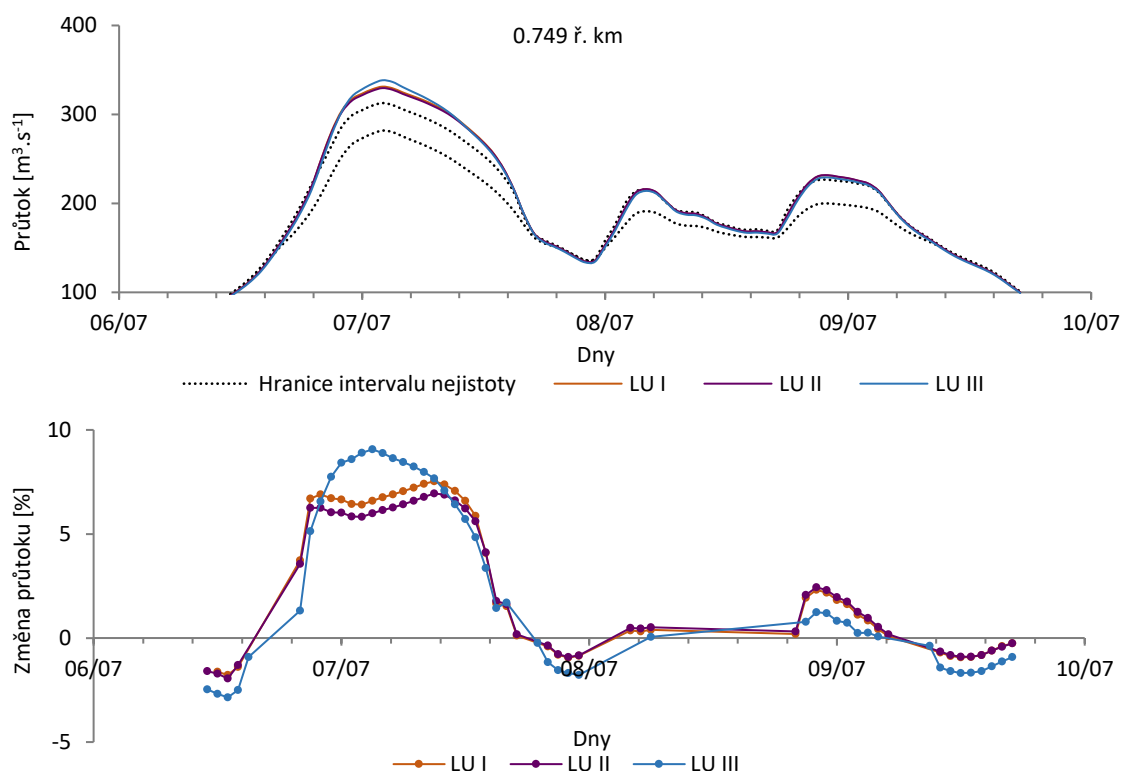
Obr. 5.30: Hydrogramy simulací tří variant revitalizačních úprav (nahore) a prokazatelné transformace kulminačních průtoků (dole) na 2.454 ř. km za povodně z roku 1997 v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Změna oproti profilu na 2,850 ř. km nastala na 2,454 ř. km modelovaného území (Obr. 5.30, nahoře), tedy na počátku úseku mezi přítokem a ústím nově navrženého koryta. Zde byla zaznamenána prokazatelná transformace průtoků, jejíž největší změna proběhla u varianty LU I, kde došlo k poklesu kulminačního průtoku o 9 % (Tab. 5.11). Transformační efekt je zde tak možné přisuzovat pouze samotné přítomnosti nově navrženého koryta. U zbylých dvou variant klesá transformační účinek se zvyšující se drsností říční nivy (Obr. 5.30, dole). Tato klesající tendence může být vysvětlena vyšší polohou hladiny pro variantu LU II a LU III, a tedy i větší průtočnou plochou v profilu, která tak má pravděpodobně za následek vyšší hodnoty průtoků oproti variantě LU I.



Obr. 5.31: Hydrogramy simulací tří variant revitalizačních úprav (nahore) a prokazatelné transformace kulminačních průtoků (dole) na 0.850 ř. km za povodně z roku 1997 v modelovaném úseku mezi 5.555 – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

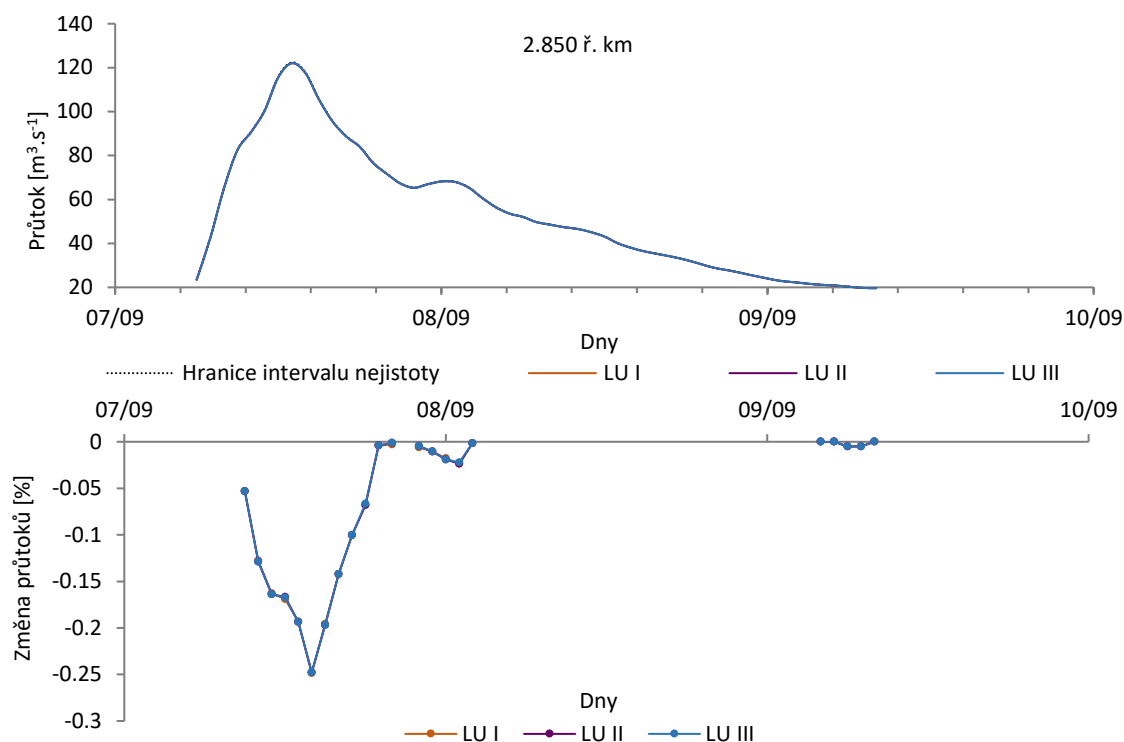
Pokles v hodnotě průtoků byl zaznamenán také na 2,048 ř. km (Tab. 5.11). Zde však výsledky spadaly do intervalu nejistot a nebylo je proto možné označit za prokazatelné. Tyto výsledky byly platné až po 0,850 ř. km (Obr. 5.31, nahoře), tedy po profil těsně před ústím Úseku III. Zde nastala nejvýznamnější prokazatelná transformace hydrogramu z roku 1997, kde došlo k poklesu kulminačních průtoků až o 13 % oproti původní situaci (Tab. 5.11), a to opět pro variantu simulace LU I (Obr. 5.31, dole).



Obr. 5.32: Hydrogramy simulací tří variant revitalizačních úprav (nahore) a prokazatelné transformace kulminačních průtoků (dole) na 0.749 ř. km za povodně z roku 1997 v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

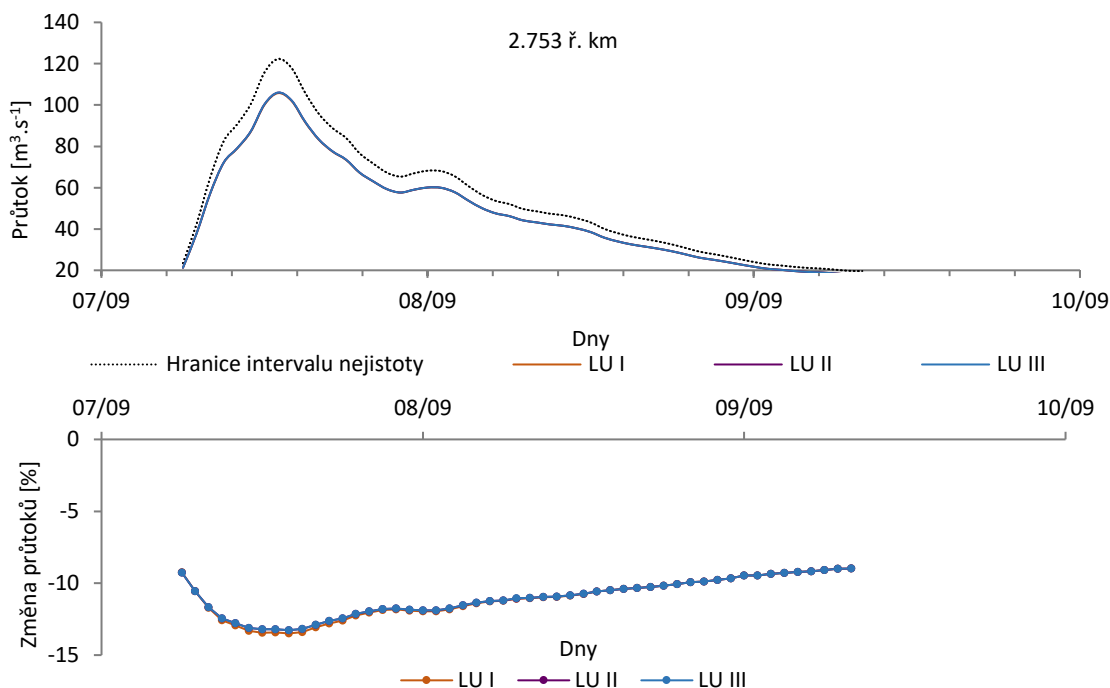
Opačný jev však nastal v následujícím profilu, tedy ihned za ústím Úseku III (Obr. 5.32, nahore). Jak je z Obr. 5.32 (dole) patrné, hodnota průtoků naopak stoupla, a to o 6 % (LU I) až 9 % (LU III), což může být zapříčiněno zvýšenou dotací průtoků z nově navrženého koryta Úseku III.

Profil na 0,549 ř. km je lokalizován mezi ústími Úseků III a II, kde byl zaznamenán vzrůst průtoků oproti původní situaci až o 6 %. Hodnoty se však nacházely uvnitř intervalu nejistoty a nebyly proto označeny za prokazatelné. Od profilu na 0,549 ř. km byla změna pozorována až v profilu na 0,0510 ř. km, kde nejvyšší hodnoty poklesu průtoků dosahovaly 8 %. Protože se však závěrový profil nachází v oblasti, která může být ovlivněna přítomností dolní okrajové podmínky, nelze výsledky považovat za prokazatelné.



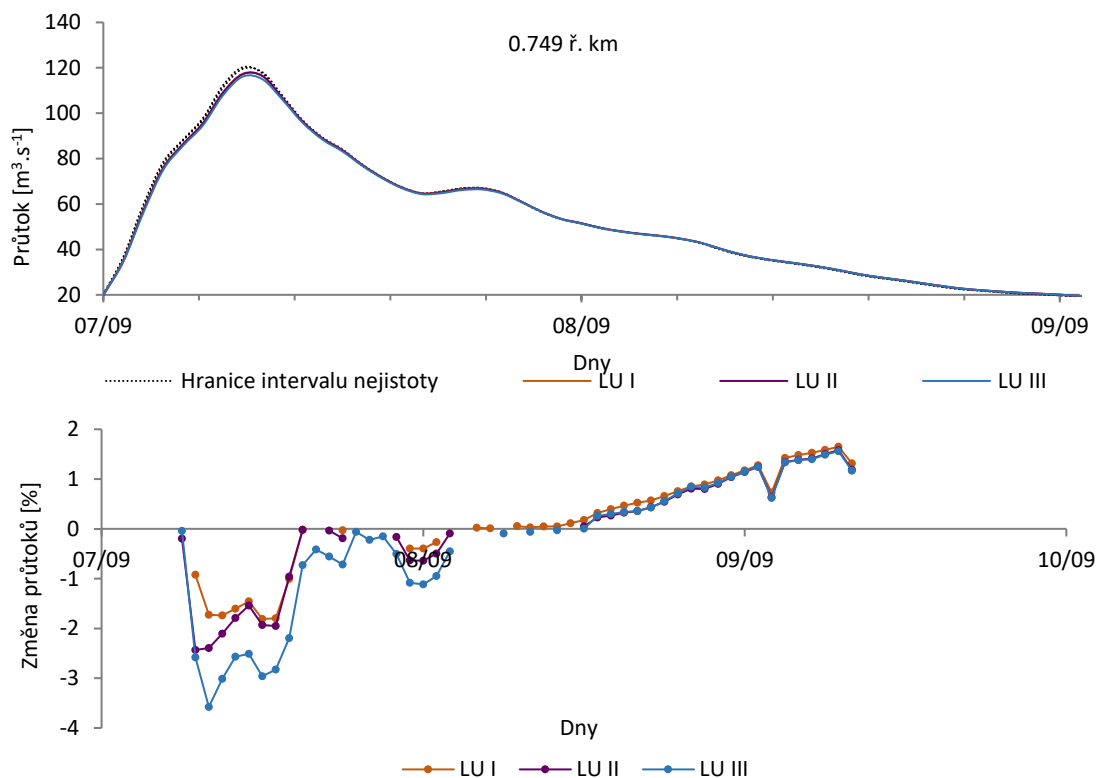
Obr. 5.33: Hydrogramy simulací tří variant revitalizačních úprav (nahore) a prokazatelné transformace kulminačních průtoků (dole) na 2.850 ř. km za povodně z roku 2007 v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Pro situaci z roku 2007, byly transformace hydrogramů označeny za prokazatelné na 3 profilech vybraných k analýze (Tab. 5.11). Transformace na 2,850 ř. km (Obr. 5.33, nahore), těsně před nátokem do Úseku I byla označena za prokazatelnou, pokles však činil pouze 0,2 % proti původní situaci, a to u všech variant revitalizačních opatření (Obr. 5.33, dole)



Obr. 5.34: Hydrogramy simulací tří variant revitalizačních úprav (nahore) a prokazatelné transformace kulminačních průtoků (dole) na 2.753 ř. km za povodně z roku 2007 v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Největší transformace průtoků však nastala ihned na následujícím profilu na 2,753 ř. km (Tab. 5.11), jak je patrné i z Obr. 5.34 (nahore) tedy ihned za počátkem nově navrženého Úseku I. Zde byl zaznamenán pokles průtoků o 13 % u všech variant revitalizace (Obr. 5.34, dole). Prokazatelnost tohoto poklesu byla sledována až po profil na 0,749 ř. km, tedy ihned za ústím Úseku III. Z toho je možné usuzovat o transformačním vlivu v korytě Rožnovské Bečvy při průtocích Q_5 vlivem revitalizačních opatření podél celého úseku mezi počátkem Úseku I ústím Úseku III.



Obr. 5.35: Hydrogramy simulací tří variant revitalizačních úprav (nahore) a prokazatelné transformace kulminačních průtoků (dole) na 0.7 ř. km za povodně z roku 2007 v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Na 0,749 ř. km došlo ke snížení míry transformace (Obr. 5.35, nahore) a k poklesu průtoků již jen o 3 % pro variantu LU III (Obr. 5.35, dole). Tento stav zůstal neměnný až po závěrový profil.

6. Diskuse

Problematika retence vody v říční nivě v zájmovém povodí Rožnovské Bečvy

Jako jedna z příčin poklesu retence vody v říční krajině jsou označovány regulace vodních toků, které omezují komunikaci mezi říčním korytem a přilehlou nivou (PITHART, 2015; LANGHAMMER, 2007; HANEL et al., 2011). Procesy regulačních opatření byl postižen také tok Rožnovské Bečvy, který za posledních 200 let ztratil na 20 % své původní délky. Kromě změny přirozeného odtokového a splaveninového režimu řeky vedly regulace vlivem zvýšené energie vody k hloubkové erozi měkkého flyšového dna, která je v případě regulovaných karpatských toků typická (ŠKARPICH, 2016a; WYZGA, 1993; CZECH et al., 2016; PAVELKA, TREZNER, 2001; ČERMÁK, 2010). Zahlubování koryt s sebou také přináší riziko poklesu hladin podzemních vod v důsledku omezení přirozeného povodňového režimu (PITHART, 2015; CLILVERD et al., 2016), a zahlubujícího se dna. I když tato skutečnost nebyla v zájmovém povodí potvrzena, je možné ze studií provedených v povodích s obdobnou geologickou stavbou a charakterem odtoku (viz ŠKARPICH, 2016a; WYZGA, 1993; ZAWIEJSKA, WYZGA, 2010) usuzovat o jistém riziku výskytu tohoto jevu. Vlivem nevhodných úprav vodních toků navíc může dojít k umocnění negativních dopadů klimatických změn na odtokové poměry.

Z těchto důvodů je tak přistoupeno k opatřením, která mají za cíl napravit negativní dopady regulací a obnovit přirozený odtokový režim vodních toků a přilehlých niv a podpořit jejich resilienci vůči nadcházejícím klimatickým změnám.

Vhodnost navržených revitalizačních úprav

Navržená opatření v modelovaném úseku Rožnovské Bečvy vycházejí přednostně z dílčích výsledků bakalářské práce autorky. Ta obsahuje výstupy inventarizace vodních náhonů v povodí Vsetínské a Rožnovské Bečvy, které vedly k otázce možnosti využití starých náhonů v řešení problematiky retence vody v říční nivě. Nástrojem se stala revitalizační opatření, která byla v místě jednoho z náhonů navržena tak, aby sloužila k podpoře rozlivů v říční nivě. Lokalita zvolená pro návrh opatření se nachází mezi 5,555 ř. km – 8,781 ř. km Rožnovské Bečvy.

Samotné opatření se skládá z úpravy části stávajícího náhonu a návrhu nového koryta v zemědělsky využívané nivě. Opatření má formu přírodě blízkého mělkého koryta odvádějícího průtoky do inundační oblasti, což umožňuje její dřívější zaplavení a tedy i podporu retence vody v říční nivě (JUST, 2005; MATOUŠKOVÁ, 2007; PITHART, 2015; MŽP, 2018).

Vzhledem k často pozměněnému stavu říční nivy bývá součástí revitalizací vodních toků změna land use odpovídající přírodě blízkým podmínkám a případně požadavkům, které jsou od revitalizace očekávány. Mezi ty často spadá zpomalení odtoku, např. zvýšením drsnosti říční nivy. To je prováděno volbou land use a vegetace v podobě extenzivně využívaných ploch, mokřadních společenstev či lužních lesů (MATOUŠKOVÁ, 2007; JUST, 2005; THOMAS, NISBET, 2007; VALENTOVÁ et al., 2010). Součástí návrhu revitalizačních úprav ve zkoumaném úseku Rožnovské Bečvy bylo proto vytvoření dvou typů land use. První je návrh s trvalými travními porosty a druhý má zvýšený podíl zalesněných ploch.

Rámec pro navržená opatření je možné nalézt v legislativních dokumentech jak na národní, tak na evropské úrovni, které v podpoře retence vody v říční nivě spatřují jeden z nástrojů k řešení řady problémů týkajících se vodního režimu říční krajiny.

Vymezená modelovaná lokalita se zároveň nachází v oblasti plánovaného řízeného inundačního prostoru, který je uveden v územních plánech dotčených obcí. Při zvážení této skutečnosti je vhodné poznamenat, že vzhledem k současné morfologii kapacitního koryta Rožnovské Bečvy dochází v daném úseku k inundaci až při průtocích nad $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($>Q_5$, stanice Rožnov pod Radhoštěm), jak bylo zjištěno z výsledků simulace hydraulického modelování. Navrhované revitalizační úpravy v modelovaném úseku by tak mohly být vnímány jako opatření sloužící k podpoře dřívější inundace a zvýšení retence vody v lokalitě, která je navíc v územních plánech k tomuto účelu určená. Navrhované revitalizační úpravy vybraného úseku, však vzhledem k aktuálním plánům zájmového povodí představují spíše zástupnou funkci konceptu revitalizačních opatření. Hlavními cíli revitalizací je zlepšení ekologického stavu vodních toků a jejich ekosystémů a obnova optimálního vodního režimu včetně podpory retence vody, a to nejen v oblasti říční nivy, ale v měřítku celého povodí (MATOUŠKOVÁ, 2007; JUST, 2005; PITHART, 2015). V případě Rožnovské Bečvy by tak úplná revitalizace znamenala navrácení toku do jeho přirozeného stavu podporou korytotvorných procesů typických pro šterkonosné toky (ŠKARPICH, 2016a; WYZGA, 1993). Taková možnost je však v současné kulturní krajině velmi obtížně realizovatelná a podobný návrh se nevyskytuje ani v žádných plánovacích dokumentech, které byly v rámci práce studovány.

Přednosti a omezení zvolených metod 2D hydraulického modelu HEC–RAS

Pro zhodnocení potenciálu navržených revitalizačních opatření ke zvýšení retence vody v říční nivě bylo využito nástrojů hydraulického modelování, které představují častý způsob pro simulaci dopadů hypotetických záměrů v povodí na odtok či simulování již aplikovaných změn a jejich vlivu na vývoj zkoumaných proměnných. Stejně jako u ostatních modelů se však i v případě tvorby 2D hydraulického modelu v programu HEC-RAS jedná o zjednodušení skutečnosti, což s sebou přináší jistou míru nejistoty.

Za účelem modelování skutečných událostí a požadování absolutních dat na výstupech modelu jsou vstupní údaje získány buď přímým měřením či z měrných stanic. V případě jakýchkoliv aproximací dat je možné očekávat jisté zkreslení výstupů simulací (CLILVERD, et al., 2016). V této práci byly pro simulaci dvou povodňových událostí vytvořeny z rozdílu hydrogramů ze stanice Valašské Meziříčí a Rožnov pod Radhoštěm dva nové hydrogramy, které byly použity jako horní okrajová podmínka modelu. Vypočtené hodnoty s sebou nesou jistou míru nejistoty, neboť nevycházejí z údajů z měrných stanic či vlastních měření.

Nejistota výstupů provedených simulací může být spatřována také v absenci kalibrace a validace modelu, která v důsledku nedostatečných kalibračních a verifikačních dat nebyla v této práci provedena a byla zastoupena pouze citlivostní analýzou. Jak však uvádí Valenta et al. (2015), nedostupnost kalibračních dat nemusí být při relativním porovnávání výstupů simulací překážkou. Ovšem v případě požadavků na výsledky s absolutními hodnotami (např. poloha hladin),

odpovídající co nejvíce skutečnosti, je tento krok nezbytnou součástí modelovacího procesu, jak dokládají např. studie Hammersmarka et al. (2008); Clilverda et al. (2016), či Czechové et al. (2015). Z těchto důvodů by tak pro případné budoucí studium nadmořských výšek hladin či rozsahů záplav ve zkoumaném území bylo vhodné kalibraci i validaci modelu provést.

Limitem zvoleného 2D modelu HEC-RAS pro analýzu retence vody v říční nivě je neschopnost modelování půdního prostředí, jako je podpovrchový odtok nebo bilance hladiny podzemní vody. Povrchová složka hydraulických modelů se jeví jako vhodná pro simulaci povodňových událostí, kde se výrazně uplatňuje topografie a drsnosti povrchu (VALENTOVÁ, et al., 2010; THOMAS, NISBET, 2007). Pro simulaci např. roční bilance odtoku po aplikaci revitalizačních opatření, kde hraje půdní složka významnou roli, již však není možné označit čistě hydraulické modely za dostačující. Takovouto možnost nabízí varianty spřažených hydraulických modelů s hydrologickými, které právě k popisu půdního prostředí mohou sloužit. Mezi takové je možné zařadit např. spřažený model MIKE SHE/MIKE 11, který pro studium dopadů revitalizačních opatření na bilanci odtoku využili Clilverd, et al. (2016) či Hammersmark, et al. (2008). Přítomnost dalšího modelu však s sebou přináší potřebu dalších vstupních údajů, mezi které jsou řazeny hloubka hladiny podzemní vody, hydraulická vodivost v nasycené i nenasyčené zóně, hodnoty evapotranspirace, index listové plochy (LAI) či hloubka dosahu kořenů.

Výstupy 2D hydraulického modelu v kontextu odborných studií

Vzhledem k záměrům této práce bylo za účelem zhodnocení vlivu návrhů revitalizačních opatření na retenci vody v povrchové části říční nivy přistoupeno k volbě 2D hydraulického modelu HEC-RAS. K analýze byly využity takové výstupy modelu, které sloužily ke zhodnocení dopadů morfologických změn a revitalizačních návrhů v prostoru říční nivy na povrchový odtok v řadě studií (např. VALENTOVÁ et al., 2010; WEYSKRABOVÁ et al. 2012; CZECH et al., 2016; THOMAS, NISBET, 2010; HAMMERSMARK et al., 2008). Mezi analyzované proměnné lze zařadit zatopené objemy, průtoky, transformace kulminačních průtoků, změny ve výšce hladin či rychlostech proudění, které byly využity také v této práci.

Z výsledků simulací vyplývá, že jednoznačně nejvýraznější změny oproti původní situaci bylo dosaženo v míře zadržených objemů a zatopených ploch při simulovaném průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Procentuální změna zatopených objemů činila nárůst až o 330 %, a to pro variantu s nejvyšší drsností povrchu (LU III). Nejvyšší změna v zatopené ploše činila nárůst o 180 % a to také pro variantu LU III. Dosažení nejvyššího rozdílu v porovnání s původní situací při průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ je vysvětleno tím, že při této situaci dochází v říční nivě k vybřežení nově navrženého koryta, které se v původní situaci nevyskytuje. Po této hodnotě průtoku již rozdíl klesá, což je způsobeno postupným vybřežením Rožnovské Bečvy. Tato skutečnost byla také patrná u výstupů simulací průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, kdy změny dosahovaly maximálně desítky procent. Výsledky se tak shodují s řadou studií, které dokládají pozitivní vliv revitalizačních opatření na dřívější a četnější rozlivy do říční nivy (HAMMERSMARK et al., 2008; CLILVERD et al., 2016; VALENTOVÁ et al., 2010). Valentová et al. (2010) ve své studii dosáhla také závěrů o trojnásobném zvýšení

zadržených objemů při maximální zátopě mezi hypotetickým návrhem zalesnění úseku přirozené říční nivy horní Lužnice a scénářem regulovaného koryta v zemědělsky využívané nivě.

Studie Valentové et al. (2010) přináší rovněž shodu s předkládanou prací v pozitivním vlivu zvýšených hodnot drsnostního koeficientu povrchu na nárůst zadržených objemů v prostoru říční nivy, který při simulovaném průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v modelovaném úseku Rožnovské Bečvy činil mezi variantou LU I a LU III rozdíl 21 %. Tato skutečnost může být vysvětlena poklesem rychlostí proudění v nivě vlivem vyšší drsnosti a následným vzduťím. Závěry o vlivu změny land use coby revitalizačních opatření v podobě zalesnění říční nivy přináší také studie Raka et al. (2016) nebo Thomase a Nisbeta (2010), které se shodují na snížených rychlostech proudění v prostředí říční nivy vlivem její zvýšené drsnosti. Stejných výsledků bylo dosaženo také při simulacích průtoků $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v modelovaném úseku Rožnovské Bečvy. Zde dosáhl největší pokles rychlostí v říční nivě 38 %, a to při změně původní situace na variantu LU III. Pokles rychlostí v inundačním prostoru říční nivy se jeví jako pozitivní vzhledem k pomalejšímu odtoku vody z inundace zpět do recipientu, a tedy i delšímu zdržení v oblasti říční nivy. Jako negativní efekt zvýšené drsnosti říční nivy, by mohl být označen nárůst rychlostí v korytě, který byl zaznamenán ve studii Thomase a Nisbeta (2010). I přesto, že popsáný jev nebyl v modelovaném úseku pozorován, měl by být převážně v povodích karpatských šterkonosných řek zvážen v rámci managementu říčních niv, např. za využití hydraulických modelů. Právě pro karpatské šterkonosné toky by zvýšení rychlostí v korytě mohlo znamenat urychlení dnové eroze (ŠKARPICH et al., 2016; WIZGA, 1996).

Kromě změn rychlostí proudění v říční nivě byla v modelovaném úseku zaměřena pozornost také na změny rychlostí proudění a výšek hladin v korytě Rožnovské Bečvy. V porovnání se změnami zatopených objemů a rozlivů však výsledky nejsou již tak jednoznačné. Z analýzy rastrů nadmořských výšek hladin při simulovaném průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (varianta LU III) vyplývá nárůst hloubek v říční nivě na úkor hloubek v korytě Rožnovské Bečvy. Na základě citlivostní analýzy byl však prokazatelný vliv revitalizačních opatření na změny v korytě Rožnovské Bečvy spíše lokální. Jednou z takových prokazatelných lokalit je závěrová část modelovaného úseku za ústím Úseku II. Prokazatelné změny ve výšce hladiny při průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ činily nárůst o 0,23 m (LU III) a pokles rychlostí činil 12 % pro všechny varianty změn land use. Dalším významnějším místem prokazatelné změny byla oblast 0,8 ř. km modelovaného úseku. Zde se při simulaci průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ projevil nárůst hladin o 0,04 m a pokles rychlostí proudění o 14 % (LU I). Vzhledem k tomu, že se profil nachází v ústí Úseku III, je možné se domnívat, že s rostoucí hodnotou průtoků roste vliv nově navrženého Úseku III na výšky hladin a rychlosti proudění v korytě Rožnovské Bečvy.

Transformace průtoků v korytě Rožnovské Bečvy nebyly stejně jako u hodnocených změn hladin a rychlostí proudění velmi výrazné. Přece jen však bylo při obou simulovaných povodňových událostech z výsledků možné usoudit na vliv revitalizačních úprav. Výsledky simulace obou povodňových událostí poukazují na prokazatelnou transformaci mezi počátkem nově navrženého Úseku I a ústím Úseku III, s poklesem o 9 % (N_{100}) a o 13 % (N_5). Za Úsekem III naopak dochází ke snížení transformačního účinku a v případě povodně N_{100} dokonce k nárůstu průtoku o 9 %, tedy o stejnou hodnotu, o kterou byly průtoky v úseku s nově navrženým korytem

transformovány. Tento jev je možné vysvětlit přítokem z ústí Úseku III, který transformační efekt opatření opět vyrovnává.

Studie analyzující dopady revitalizačních opatření v podobě podpory rozlivů do říční nivy a změn land use, se obecně shodují na pozitivním transformačním účinku povodňových průtoků, který však klesá s rostoucí extremitou povodně (Langhammer, 2007; Valentová et al., 2010; Svoboda et al., 2015; Janský, Turek, 2012), což je patrné také z výstupů simulací povodňových událostí ve zkoumaném úseku Rožnovské Bečvy. Jak popisují závěry studií Raka et al. (2016), Valentové et al. (2010) nebo Weyskrabové et al. (2012), disponují změny land use, v podobě zvýšené hodnoty drsnostního parametru, potenciálem jak pro transformaci, tak i translaci povodňových průtoků. V modelovaném úseku však vlivem zvýšení drsnosti povrchu nedošlo k projevům translace ani ke zvýšení transformace průtoků. V případě povodně N_{100} byl dokonce pozorován opačný trend, tedy nárůst transformace se snižující se drsností říční nivy, který mezi variantami LU I a LU III činil rozdíl 3–9 %. Tento jev může být vysvětlen vyšší polohou hladin, větší průtočnou plochou, a tedy i vyššími průtoky v případě varianty LU III. Vzhledem k málo významnému vlivu změn land use na transformační účinky průtoků je možné se domnívat, že nejvýznamnějším prvkem, který transformaci průtoků ovlivnil, byly morfologické úpravy Úseku I a nově vytvořené koryto v Úseku III.

7. Závěr

Rožnovská Bečva si stejně jako většina toků v ČR i Evropě prošla procesem regulací, což se projevilo zejména na změně morfologie koryta, odtokových a erozně akumulčních procesech a celkovém omezení komunikace s říční nivou. Riziko zintenzivnění dopadů regulací je navíc v posledních dekádách spojeno s nastupujícími klimatickými změnami projevujícími se zvýšeným odtokem během zimních měsíců, sníženým odtokem v průběhu teplého půlroku a intenzivnějšími extrémními hydrologickými jevy. Jedním z prosazovaných opatření zmírňujících dopady těchto procesů jsou revitalizace vodních toků a říčních niv umožňující jejich opětovné propojení formou podpory přirozených korytotvorných a odtokových procesů.

Z těchto důvodů byly v zájmovém povodí Rožnovské Bečvy v úseku mezi 5,555 ř. km – 8,781 ř. km navrženy tři revitalizační opatření části již nevyužívaného protékaného náhonu (8,301 ř. km) a přilehlé říční nivy za účelem analýzy potenciálního vlivu na změny povrchové retence vody v říční nivě. Navržená opatření se skládala z rozvlnění kynety počáteční části náhonu (Úsek I), od které byla v oblasti dnes zemědělsky využívané říční nivy navržena nová větev přírodě blízkého koryta (Úsek III) ústící do koryta Rožnovské Bečvy na 6,384 ř. km. Úsek II představoval zbylé koryto současného náhonu vtékající do Zašovského potoka se zaústěním do Rožnovské Bečvy na 5,590 ř. km. V dalším kroku byly v oblasti nově vytvořených úseků koryt vytvořeny dva návrhy změny land use s nižší (LU II, zatravnění) a vyšší (LU III, zalesnění) drsností povrchu, které zároveň převyšovaly hodnoty drsnosti současného povrchu. Celkem tak vznikly tři varianty revitalizačních opatření. První varianta obsahovala současný stav land use a nově navržené koryto. Zbylé dvě varianty zahrnovaly navíc návrhy změn land use.

Pro simulaci navrhovaných úprav byl zvolen 2D hydraulický model HEC-RAS v režimu neustáleného proudění. Jako vstupní data sloužily dva typy souborů. Prvním byly hypotetické průtoky v rozsahu od $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do maximálního dosaženého průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Druhým typem vstupních dat byly hydrogramy dvou povodňových událostí z roku 1997 (N_{100}) a z roku 2007 (N_5) poskytnuté ČHMÚ. Celkem bylo zkoumáno pět hydraulických proměnných: zatopený objem a plocha záplavy v inundaci, nadmořské výšky hladin, rychlosti proudění a transformace kulminačních průtoků v hlavním korytě Rožnovské Bečvy. První čtyři proměnné byly zkoumány za využití hypotetických průtoků. Transformace kulminačních průtoků byly zkoumány simulací povodňových událostí. Protože pro zkoumaný úsek nebyla k dispozici kalibrační ani verifikační data, bylo přistoupeno k zástupné metodě označení prokazatelnosti výsledků navržených revitalizačních úprav, která byla založena na citlivostní analýze koeficientů drsnosti.

Z předložených výsledků vyplývá, že největších změn vlivem navržených revitalizačních opatření bylo oproti původní situaci dosaženo při simulaci průtoků $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v případě zadržovaných objemů (3x vyšší) a zaplavených ploch (2x vyšší) v říční nivě. Z analýzy těchto proměnných vyplývá, že díky aplikaci revitalizačních opatření došlo k vyběžení nově navrženého koryta do říční nivy ještě před inundací z regulovaného koryta Rožnovské Bečvy, což může vést k četnějšímu výskytu událostí příznivých pro retenci vody v říční nivě. Patrný je také vliv změn drsností půdního povrchu. V tomto případě varianta revitalizačního návrhu s nejvyšší hodnotou drsnostního koeficientu (LU III) dosahovala největších změn zadržovaných objemů a zaplavených

plach ve srovnání se současnou situací. Vliv navržených úprav na změny nadmořských výšek hladin a rychlostí proudění v korytě Rožnovské Bečvy nepřinesl tak výrazné změny. Obecně dochází k poklesu hladiny v korytě vlivem odvádění průtoků do nivy, a jejich nárůstu za revitalizovaným úsekem. Změny byly zaznamenány také za ústím nově navrženého koryta Úseku III, kde došlo k lokálnímu vzrůstu hladin a poklesu rychlostí proudění s narůstajícími průtoky. Tyto změny byly však jen minimální. Vliv změny land use na rychlosti proudění se výrazně projevil při inundaci do říční nivy, a to u varianty s nejvyšší drsností povrchu (LU III), kde byl zaznamenán jejich pokles až o 38 %. Transformační účinek revitalizačních úprav sleduje typický trend, kdy s rostoucí extremitou dochází k poklesu transformačního účinku nivy. I přes nízké hodnoty transformace však byly u obou analyzovaných povodňových událostí zaznamenány poklesy průtoků v oblasti s revitalizačními úpravami, tedy mezi Úsekem I a Úsekem III.

Po zhodnocení výstupů předkládané práce je možné tvrdit, že byl prokázán potenciál revitalizačních úprav využívajících bývalého vodního náhonu na podporu retence vody v říční nivě ve zkoumaném úseku Rožnovské Bečvy. Je však nutné podotknout, že navržené opatření na tak malém území nelze považovat za řešení problematiky zvýšení retence vody na úrovni celého povodí. Ke zvýšení rozsahu účinku opatření k podpoře rozlivů v říční nivě by však mohly sloužit také další potenciální lokality. Územní plány obcí v povodí Rožnovské Bečvy nabízí další 4 oblasti v údolní nivě určené k plnění retenční funkce, kde by realizace nového bočního koryta mohla představovat efektivnější prostředek jejich využití. Tyto oblasti by bylo možné dále rozšířit o 14 lokalit s protékajícími náhony vyskytujícími se v povodí Rožnovské i Vsetínské Bečvy, které by mohly sloužit stejnému účelu prezentovanému v této práci.

I přesto, že výsledky simulací použitého hydraulického modelu přinášejí závěry o pozitivním vlivu navržených opatření na povrchovou retenci v říční nivě, nezahrnují popis jejich vlivu na celkovou bilanci odtoku. V tomto případě se tak nabízí prostor pro budoucí kombinaci hydraulického a hydrologického modelu za účelem detailnějšího popisu povrchových i podpovrchových procesů včetně zapojení vegetační složky. Vzhledem k absenci takovýchto údajů v zájmovém povodí by jejich vyhodnocení mohlo představovat přínos pro plánovací procesy v povodí Rožnovské Bečvy.

8. Literatura a informační zdroje

8.1. Literatura

ABID, M., LAL, R., (2008): Tillage and drainage impact on soil quality: II. Tensile strength of aggregates, moisture retention and water infiltration. *Soil and Tillage Research*. 103: 364-372

ACREMAN, M., RIDDINGTON, R., BOOKER, D., (2003): Hydrological impacts of floodplain restoration: a case study of the River Cherwell, UK. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, European Geosciences Union, 7(1), pp. 75-85.

BIČÍK I., LANGHAMMER, J., ŠTYCH, P., KUPKOVÁ, L. (2008): Long-term land-use changes in Czechia as a flood risk influencing factor. *Acta Universitatis Carolinae – Geographica*, 2, pp. 29-52.

BRÁZDIL, R. a K. KIRCHNER. (2007): Vybrané přírodní extrémy a jejich dopady na Moravě a ve Slezsku: Selected natural extremes and their impacts in Moravia and Silesia. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita, 2007, 431 s. ISBN 978-80-210-4173-8..

BRÁZDIL, R., TRNKA, M., et al.. (2015): Sucho v českých zemích: minulost, současnost, budoucnost. Centrum výzkumu globální změny Akademie věd České republiky, v.v.i.. Brno.

BRUNNER, G., W. (2016a): HEC-RES River Analysis System - User's Manual Version 5.0. US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC).

BRUNNER, G., W. (2016b): HEC-RAS River Analysis System – Hydraulic Reference Manual Version 5.0. US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC).

BRUNNER, G., W. (2016c): HEC-RAS River Analysis System – 2D Modelling User's Manual Version 5.0. US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC).

CAMORANI, G., CASTELLARIN, A., BRATH, A. (2005). Effects of landuse changes on the hydrologic response of reclamation systems. *Physics and Chemistry of the Earth*. 30. 561-574

CASULLI, V. (2008): A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 60. 391-408.

CLILVERD, H., THOMPSON, J., HEPPEL, C., SAYER, C., AXMACHER, J. (2016): Coupled hydrological/hydraulic modelling of river restoration impacts and floodplain hydrodynamice. *River Research and Application*. 32: 1927-1948.

CULEK, M. (1996): Biogeografické členění České republiky. Praha: Enigma, 1996, 347 s. ISBN 80-85368-80-3.

CZECH, W., RADECKI-PAWLIK, A., WYZGA, B., HAJDUKIEWICZ, H. (2016): Modelling the flooding capacity of a Polish Carpathian river: A comparison of constrained and free channel condition. *Geomorphology* 272, 32-42.

- ČERMÁK, V., KREJČÍ L., KREJČÍ, M., POŠTULKA, Z. (2010): Bečva pro život. Koncepce přírodě blízké protipovodňové ochrany Pobečví. Unie pro řeku Moravu. Brno.
- ČHMÚ (2005): Zpráva o hydrologické situaci v povodí Odry a horní Moravy v období od 24. 8. – 25. 8. 2005. Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ostrava.
- ČHMÚ (2007): Mimořádná srážko-odtoková situace na Odře a horní Moravě počátkem září 2007. Hydrometeorologická zpráva. Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ostrava.
- ČHMÚ (2014): Hydrometeorologická zpráva o povodňové situaci v Moravskoslezském a Olomouckém kraji ve dnech 14. - 18. 5. 2014. Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ostrava.
- ČHMÚ (2017a): Hydrometeorologická zpráva o povodňové situaci v Moravskoslezském a Zlínském kraji ve dnech 25. - 30. 4. 2017. Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ostrava.
- DAŇHELKA, J. et al. (2015): Vyhodnocení sucha na území České republiky v roce 2015. Český hydrometeorologický ústav.
- DAŇHELKA, J., KREJČÍ, J., ŠÁLEK, M., ŠERCL, P., ZEŽULÁK, J. (2003): Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR. ČZÚ, Praha, 214 s.
- DAVID, V. (2012): Stanovení pasivního retenčního objemu. In: Pithart, D.: Význam retence vody v říčních nivách. Daphne ČR
- DEMEK, J., KALVODA, J., KIRCHNER, K., VILÍMEK, V. (2006): Geomorphological Aspects of Natural Hazards and Risks in the Czech republic. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica* 40:79-92.
- DEMEK, J., MACKOVIČIN, P. (2006): Hory a nížiny - zeměpisný lexikon ČR. Vyd. 2. Brno: AOPK ČR, 2006, 580 s. ISBN 80-86064-99-9.
- DI BALDASSARE, G., CASTELLARIN, A., BRATH, A. (2010): Analysis of the effects of levee heightening on flood propagation: example of the River Po, Italy. *Hydrological Sciences Journal*. 54:6, 1007-1017.
- DIXON, J. S., SEAR, D. A., ODoni, N. A., SYKES, T., LANE, S. N. (2016): The effect of river restoration on catchment scale flood risk and flood hydrology. *Earth surface Processes and Landforms*. 2016, 41(7), 997-1008.
- DOCHARTAIGH, B. et al. (2019): Geological structure as a control on floodplain groundwater dynamics. *Hydrogeology Journal* (2019) 27:703–716.
- DOLEŽEL, F., KOBLIHOVÁ, E., LIPINA, P., WINKLER, I., ŽIDEK, D. (1996): 3. Zpráva o povodňové situaci na území severní Moravy v září 1996. Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ostrava.
- DOSTÁL et al (2012a): Procesy, které se uplatňují při retenčním působení nivy. In: Pithart, D. (ed.): Význam retence vody v říčních nivách. Daphne ČR

- DOSTÁL et al (2012b): Charakteristiky nivy důležité pro využití jejího retenčního potenciálu. In: Pithart, D.: Význam retence vody v říčních nivách. Daphne ČR
- FERGUSON, R. I. (1993): Understanding braiding processes in gravel-bed rivers: progress and unsolved problems. Geological Society, London, Special Publications, 75, pp. 73-87.
- FOHRER, N., et al., 2001: Hydrologic response to land use changes on catchment scale. Physics and Chemistry of the Earth 26, 577-582.
- GALIA, T., ŠKARPICH, V. (2013): Korytové sedimenty a geomorfologické procesy vysokogradientových toků ve flyši Moravskoslezských Beskyd. Geologické Výzkumy na Moravě a ve Slezsku, 20, 17-21.
- GEERLING, G., KATER, E., VAN DEN BRINK, C., BAPTIST, M., RAGAS, A., SMITS, A. (2008): Nature rehabilitation by flooding excavation: The hydraulic effect of 16 years of sedimentation and vegetation succession along the Waal River, NL. Geomorphology 99, 317-328.
- HALL, J., ARHEIMER, B., BORGA, M., BRÁZDIL, R., CLAPS, P. et al.. (2016): Understanding flood régime changes in Europe: A state of art assessment. Hydrology and Earth System Sciences, European Geosciences Union, 2014, 18 (7), pp. 2735-2772.
- HAMMERSMARK, C., RAINS, M., MOUNT, J. (2008): Quantifying the hydrological effect of stream restoration in a montane meadow, northern California, USA. River Research and Applications. 24. 735 – 753.
- HANEL, M., KAŠPÁREK, L., MRKVIČKOVÁ, M., HORÁČEK S., VIZINA, A., NOVICKÝ, O., FRIDRICHOVÁ, R. (2011): Odhad dopadu klimatické změny na hydrologickou bilanci v ČR a možná adaptační opatření. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i.. Praha.
- HORSKÝ, L. et al. (1970): Hydrologické poměry ČSSR. Díl II. (1967). Hydrometeorologický ústav, Praha
- HÜMANN, M., SCHÜLER, G., MÜLLER C., SCHNEIDER R., JOHST M., CASPARI, T. (2011) – Identification of runoff processes – The impact of different forest types and soil properties on runoff formation and floods. Journal of Hydrology. 409, 637-649.
- HUNTINGTON, T. G., (2006): Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. Journal of Hydrology, 319, 83-95.
- CHLUPÁČ, I., BRZOBOHATÝ, R., KOVANDA, J., STRÁNÍK, Z. (2002): Geologická minulost České republiky. Praha: Academia Praha, 2002. 436 s. ISBN 80-200-0914-0.
- CHYTRÝ, M. et al. (2010): Katalog biotopů České republiky. 2. vyd. Praha: Agentura ochrany přírody a krajiny ČR., 445 s.
- JANSKÝ, B., TUREK, M., (2012): Hydrologické procesy v nivách a jejich význam pro retenci vody. In: Pithart, D.: Význam retence vody v říčních nivách. Daphne ČR
- JENÍČEK, (2006): Modelování srážko-odtokových procesů v závislosti na změnách krajinného pokryvu. In Langhammer, J (ed.): Změny krajiny jako ovlivňující faktor průběhu a projevů extrémních povodní. PřF UK, Praha. s. 75-84.

- JONOV, M., MADĚŘÍČKOVÁ, Š., ŘEHÁNEK, T., VOLNÝ, R., WINKLER, I. (2010): Hydrometeorologická zpráva o povodni ve dnech 16. – 21. května 2010 a 2. – 6. června 2010 v povodí Odry, Bečvy a horní Moravy. Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ostrava.
- JUST, T. a kol. (2003): Revitalizace říčního prostředí. AOPK ČR. Praha
- JUST, T. a kol.: (2005): Vodohospodářské revitalizace a jejich uplatnění v ochraně před povodněmi. 3. ZO ČSOP Hořovicko, Ekologické služby, s. r. o., AOPK ČR a MŽP ČR, Praha.
- KASPÁREK, L. (2006): Vyhodnocení jarní povodně 2006 na území České republiky. Souhrnná zpráva. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka. Praha.
- KIRCHNER, K., KREJČÍ, O. (2002): Slope deformations and their significance for relief development in the middle part of Outer Western Carpathians in Moravia. Moravian Geographical Reports. 2, 10.
- KLÖCKING, B., HABERLANDT, U. (2002): Impact of land use change on water dynamics – a case study in temperate meso and macroscale river basin. Physics and Chemistry of the Earth 27.
- Koalice pro řeky, z.s. (2015): Studii proveditelnosti revitalizace Bečvy Vsetínské od ř. km 82,500 až k pramenným úsekům.
- KRAHE, et al (2002): Development of Methodologies for the Analysis of the Efficiency of Flood Reduction Measures in the Rhine Basin on the Basis of Reference Floods. Final report of IRMA-SPONGE.
- KRAKOVSKÁ, A., NOVÁKOVÁ, J., UNUCKA, JAN., MELČÁKOVÁ, I., LAPČÍCK, V., ANDRÁŠ, P., KLIMŠA, L. (2017): Proposal of potential flood control. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences. (12). 283-292.
- KRÁLOVEC, V., KLIMENT, Z., VLČEK, L., (2016): Hodnocení retence vody v půdě v lesním a nelesním prostředí. Zprávy lesnického výzkumu. 61, 3, 181-189.
- KRÁSNÝ, J., CÍSLEROVÁ, M., ČURDA, S. et al. (2012): Podzemní vody České republiky: regionální hydrogeologie prostých a minerálních vod. Praha: Česká geologická služba, 2012. ISBN 978-80-7075-797-0.
- KRAUSE, S., JACOBS, J., BRONSTERT, A. (2007): Modelling the impact of land-use and drainage density on the water balance of a lowland-floodplain landscape in northeast Germany. Ecological Modelling. 200. pp. 475-492.
- KUBÁT, J. (2009): Vyhodnocení povodní v červnu a červenci 2009 na území České republiky. Souhrnná zpráva. Český hydrometeorologický ústav. Praha.
- KURÁŽ, V., SOUKUP, M. (2004): Vliv odvodnění na půdní a hydrologické režimy. Vodní Hospodářství. roč. 64 č. 11 r. 2014 str.5-9.
- KVĚTOŇ, V., VOŽENÍLEK, V. (2011): Klimatické oblasti Česka: klasifikace podle Quitta. Olomouc, Univerzita Palackého v Olomouci, 20s. 978-80-244-2813 0
- LANGHAMMER, J. (2007): Antropogenní změny v krajině a povodňové riziko. In: Langhammer, J. (ed.): Povodně a změny v krajině. PřF UK v Praze, MŽP ČR, Praha, s. 343-355.

- LANGHAMMER, J., (2014): HEM 2014 Metodika typově specifického hodnocení hydromorfologických ukazatelů ekologické kvality vodních toků.
- LICHNER, L., TESAŘ, M., ŠÍŘ, M.. (2004): Testování retenční schopnosti půdy. Sborník příspěvků z konference Aktuality Šumavského výzkumu II. Správa NP a CHKO Šumava, Vimperk, 63-67.
- MATOUŠKOVÁ, M. (2007): Revitalizace vodních ekosystémů a jejich význam v protipovodňové ochraně. In: Langhammer, J. (ed.): Povodně a změny v krajině. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Praha.
- McAPLIN, T., SHARP, J., SCOTT, S., SAVANT, G. (2013): Habitat Restoration and Flood Control Protection in the Kissimmee River. *Wetlands* 33, 551-560.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005): Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis. Washington, DC: Island Press.
- Ministerstvo zemědělství (2000): Strategie ochrany před povodněmi pro území České republiky.
- Ministerstvo životního prostředí (2018): Katalog přírodě blízkých opatření pro zadržení vody v krajině. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka. Praha
- MONTAGNE, D., CORNU, S., LE FORESTIER, L., COUSIN, I. (2009): Soil Drainage as an Active agent of Recent Soil Evolution: A Review. *Pedosphere*. 19(1), 1-13.
- NAEF, F., SCHERRER, S., WEILER, M. (2002): A proces based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change. *Journal of Hydrology* 267, 74-79.
- NIEHOFF, D., FRITSCH, U., BRONSTERT, A. (2002) Land-use impacts on storm-runoff generation: Scenarios of land-use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany. *Journal of Hydrology* 267(1):80-93.
- NIENHUIS, P., H., Leuven, R., S. (2001): River resotration and flood protection: controversy or synergism?. *Hydrobiologia* 4444: 85-99.
- O'CONNEL, P., EWEN, J., O'DONNELL G. (2007): Is There a Link between Agricultural Land-Use Management and Flooding? *Hydrology and Earth System Sciences*. 11(1), 96–107.
- PAVELKA, J., TREZNER, J. (2001): Příroda Valašska (okres Vsetín). Vsetín: Český svaz ochránců přírody, 488 s., 64 s. obr. příl. ISBN 8023878921.
- PITHART, D. (2015): Povodně a sucho – krajina jako základ řešení. 1. Ekosystémy říční krajiny. *Živa* (1). 21-24.
- PLATE, E., J. (2002): Flood risk and flood management. *Journal of Hydrology* 267
- RAK, G., KOZELJ, D., STEINMAN, F., (2016): The impact of floodplain land use on flood wave propagation. *Natural Hazards*, 83, 425-443.
- ROBINSON M., et al, (2003): Studies of the impact of forrest on peak flows and baseflows: a European perspective. *Forest Ecology and Management*, 186, 85-97

- ROMÁNKOVÁ, L. (2010): Revitalizace Rožnovské Bečvy v kontextu s protipovodňovými opatřeními. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, Brno, 2010.
- ROMANOWICZ, R. J., BOGDANOWICZ, E., DEBELE, S. E., DOROSKIEWICZ, J., HISDAL, H. et al.. (2016): Climate change impact on hydrological extremes: Preliminary results from the Polish-Norwegian Project. *Acta Geophysica*, 64, 2, pp. 477-509.
- ROMÁŠEK, P. (2007): Studie ochrany před povodněmi na území Zlínského kraje. Hydroprojekt CZ a.s.. Praha.
- SCHOBER, B., HAUER, CH., HABERSACK, H. (2015): A novel assessment of the role of Danube floodplains in flood hazard reduction (FEM method). *Natural Hazards*, 75, S33-S50.
- SMITH, K., WARD, R. (1998): *Floods*. John Wiley & Sons, Chicester, 382 s.
- SNĚHOTA, M., ŠANDA, M. (2012) Stanovení retenčního prostoru v půdách. In: Pithart, D.: Význam retence vody v říčních nivách. Daphne ČR
- STOCKER, T. F., QIN, D., PLATTNER, G. K., TIGNOR, M., ALLEN, S. K. et al.. (2013): *Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 1535 s.
- STŘEDA T., LITSCHMANN T., PALÁTOVÁ E., (2008): Vlhkost půdy pod různými typy vegetace v říční krajině. In ROŽNOVSKÝ J., LITSCHMANN T., (ed): „Bioklimatologické aspekty hodnocení procesů v kraji
- ŠINDLAR, M. (2012): Geomorfologické procesy vývoje vodních toků. Část I., Typologie korytotvorných procesů. Vydání druhé. Hradec Králové: Sindlar Group, 2012. ISBN 978-80-254-2445-2.
- ŠKARPICH, V., HORÁČEK, M., GALIA, T., KAPUSTOVÁ, V., ŠALA, V. (2016b): The effects of river patterns on riparian vegetation: A comparison of anabranching and single-thread incised channels. *Moravian Geographical Reports*
- ŠKARPICH, V., KAŠPÁREK, Z., GALIA, T., HRADECKÝ, J. (2016a): Antropogenní impakt a jeho odezva v morfologii koryt beskydských šterkonosných toků: Příkladová studie řeky Ostravice, Česko. *Geografie*, 121, 1, 99–120.
- TENG, J., JAKEMAN, A., J., VAZE, J., CROKE, B., F., W., DUTTA, D., KIM, S. (2017): Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling and Software*. 90. 201-2016.
- TESAŘ, M., ŠÍR, M., SYROVÁTKA, O., PRAŽÁK, J., LICHNER, L., KUBÍK, F. (2001): Soil water régime in head waters regions – observation, assessment and modelling
- THOMAS, H., NISBET, T. (2007): An Assessment of the Impact of Floodplain Woodland on Floods Flows. *Water and Environment Journal*.
- TOLASZ, R. et al. (2007): *Atlas podnebí Česka*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 255 s.

- TOMÁŠEK, M. (2003): Půdy České republiky. Česká geologická služba. 4. vyd. Praha. 67 s. [41]. ISBN 978-80-7075-688-1.
- TREML, P. (2012): Největší hydrologická sucha 20. století. Workshop Adolfa Patery 2012. Extrémní hydrologické jevy v povodích.
- TRENBERTH, K. E., (2011): Changes in precipitation with climate change. *Climate research*, 47, pp. 123-138.
- TRNKA, M., KERSEBAUM, K. C., EITZINGER, J., HAYES, M., HLAVINKA, P. et al.. (2013): Consequences of climate change for the soil climate in Central Europe and the central plains of the United States. Drought Mitigation Center Faculty Publications. 16.
- TRPKOŠOVÁ, D. (2006): Odtokové poměry v hydrologických prostředích s převládající puklinovou porositou: Srovnání krystalinika a flyšové zóny. Diplomová práce. Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze.
- Územní plán obce Střítež nad Bečvou (2013): Územní plán. Střítež nad Bečvou. Urbanistický ateliér Zlín s.r.o.. Zlín.
- Územní plán obce Zašová (2017): Územní plán. Zašová. Ing. arch. Miroslav Dubina. Zlín.
- VALENTA, P., VALENTOVÁ, J., KOUDELKA, P. (2012): Metody hodnocení transformační funkce nivy. In: Pithart, D. (ed.): Význam retence vody v říčních nivách. Daphne ČR.
- VALENTA, P., VALENTOVÁ, J., KOUDELKA, P. (2015): Metody hodnocení transformační funkce nivy. In: Pithart, D.: Význam retence vody v říčních nivách. Daphne ČR
- VALENTOVÁ, J., VALENTA, P., WEYYSKRABOVÁ, L. (2010): Assessing the retention capacity of a floodplain using a 2D numerical model. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 58, 4, 221-232
- VESELÝ, (2012): Přírodě blízká protipovodňová opatření – cesta k renesanci niv?. In: Pithart, D.: Význam retence vody v říčních nivách. Daphne ČR
- WEYSKRABOVÁ, L., VALENTOVÁ, J., VALENTA, P., DOSTÁL, T. (2012): Comparison of Available Measures for Increasing Floodplain Retention Capacity. *Littera Scripta*. 2012, 5(1).
- WYZGA, B., (1993): River response to channel regulation: Case study of the Raba river, Carpathians, Poland. *Earth Surface Processes and Landforms*
- ZAWIEJSKA, J., WYZGA, B., (2010): Twentieth-century channel change on the Dunajec River, southern Poland: Patterns, causes and control. *Geomorphology* 117(3):234-246
- ZELÍKOVÁ, N. (2014): Vliv využívání vodní energie na fluvialní systémy v povodí Bečvy v Západních Beskydech. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta.

8.2. Elektronické zdroje

AOPK (2017): Rozbory CHKO Beskydy k 31. 12. 2017. Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky. [online]. 2017 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <http://beskydy.ochranaprirody.cz/res/archive/419/068951.pdf?seek=1557905653>

AOPK (2019): Regionální pracoviště Správa CHKO Beskydy. Charakteristika oblasti. Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky [online]. 2019 [cit 2019-03-20]. Dostupné z: <http://beskydy.ochranaprirody.cz/charakteristika-oblasti/>

BETSHOLTZ, A, NORDLÖF, B. (2017): Potentials and limitations of 1D, 2D and coupled 1D-2D flood modelling in HEC-RAS. Master Thesis. Division of Water Resources Engineering. Department of Building and Environmental Technology. Lund University [online]. 2017 [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/8904721>

ČHMÚ (2017b): Průměrné denní průtoky ze stanice Rožnov pod Radhoštěm za období 1952–2010.

ČHMÚ (2018): Průměrné hodinové průtoky ze stanice Valašské Meziříčí, Rožnov pod Radhoštěm pro povodňové události z roku 1997 a 2007.

ČHMÚ (2019): Evidenční list hlásného profilu č.325 [online]. 2019 [cit 2019-02-10]. Dostupné z: http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfbk_detail.php?seq=307351

ČÚZK (2017): Digitální model reliéfu 5. generace, Český úřad zeměměřický a katastrální.

Eurepan Commisson (2013). Links between the Floods Directive (FD 2007/60/EC) and Water Framework Directive (WFD 2000/60/EC). Technical Report – 2014 – 078. [online]. 2013 [cit 2018-01-12]. Dostupné z: <https://circabc.europa.eu/sd/a/124bcea7-2b7f-47a5-95c7-56e122652899/inks%20between%20the%20Floods%20Directive%20and%20Water%20Framework%20Directive%20-%20Resource%20Document>

GOODEL, CH. (2010): Downstream Boundary-Normal Depth?. The RAS Solution. The Place for HEC-RAS Modelers. [online]. 2010 [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: <http://hecrasmodel.blogspot.com/2010/01/downstream-boundary-normal-depth.html>

HLADNÝ, J. (1998): Vyhodnocení povodňové situace v červenci 1997. Souhrnná zpráva. Český hydrometeorologický ústav. Praha. [online]. 1998 [cit. 12. 10. 2017]. Dostupné z: <http://voda.chmi.cz/pov97/uvod.html>

HYDROPROJEKT CZ (2013): Studie na ochranu před povodněmi na území Zlínského kraje. [online]. 2013 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <https://vms4.kr-zlinsky.cz/ppo/>

Ministerstvo zemědělství (2005): Katalog opatření. [online]. 2005 [cit 2019-05-16]. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/mze/voda/planovani-v-oblasti-vod/plany-povodi-pro-1-obdobi/podpurne-dokumenty/katalog-opatreni.html>

Ministerstvo životního prostředí (2015): Národní akční plán adaptace na změnu klimatu. Implementační dokument Strategie přizpůsobení se změně klimatu v podmínkách ČR. [online]. 2015 [cit 2019-05-18]. Dostupné z:

[https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/narodni_akcni_plan_zmena_klimatu/\\$FILE/OEO_K-NAP_cely_20170127.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/narodni_akcni_plan_zmena_klimatu/$FILE/OEO_K-NAP_cely_20170127.pdf)

Ministerstvo životního prostředí a Ministerstvo zemědělství (2015): Plán pro zvládání povodňových rizik v povodí Dunaje. Zpracovaný podle ustanovení § 25 zákona č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon) pro období 2015 – 2021. [online]. 2015 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/mze/voda/planovani-v-oblasti-vod/priprava-planu-povodi-pro-2-obdobi/zverejnene-informace/narodni-plany-povodi-1/narodni-plany-povodi-dunaje.html>

Plán dílčích povodí Moravy a Váhu (2015): Plán dílčího povodí Moravy a Váhu 2016–2021. Povodí Moravy, s.p.. [online]. 2015 [cit. 2017-08-15]. Dostupné z: http://pop.pmo.cz/download/web_PDP_Morava_kraje/index.html

PMO (2017): Zpravodaj o vodě 2 /2017. Povodí Moravy s.p.. [online]. [cit. 2019-02-14]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/download/povodi-17-2.pdf>

PMO (2019): VD Horní Bečva. Povodí Moravy, s.p. [online]. 2019 [cit. 2019-06-03] Dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/o-podniku/vodni-dila/horni-becva/>

Směrnice Evropského Parlamentu a rady (2000). Směrnice 2000/60/ES. Úřední věstník č. L 327. Evropský parlament a rada, Brusel 2000, 98 s. [online]. [cit. 2018-01-12]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/ALL/?uri=CELEX%3A32000L0060>

TKSP ČR (2004): Taxonomický klasifikační systém půd ČR [online]. 2004 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://klasifikace.pedologie.czu.cz/index.php?action=showPudniKategorie>

VÚV T. G. M. (2018): DIBAVOD. Digitální báze vodohospodářských dat, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka. [online]. 2018 [cit. 2019-03-13] Dostupné z: <http://www.dibavod.cz/>

VÚV TGM (2017): Charakteristiky toků a povodí ČR. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i. [online]. 2017 [cit. 2019-06-13] Dostupné z: <http://www.dibavod.cz/24/charakteristiky-toku-a-povodi-cr.html>

8.3. Mapové služby

ČGS (2019a): Mapová služba České geologické služby. Geologické mapy 1:50 000. WMS služba.[online]. 2012 [cit. 01. 5. 2019]. Dostupné z: <http://mapy.geology.cz/arcgis/services/Geologie/geocr50/MapServer/WMSServer>.

ČGS (2019b): Mapová služba České geologické služby. Půdní mapy 1:50 000. WMS služba. [online]. 2012 [cit. 01. 5. 2019]. Dostupné z: https://mapy.geology.cz/arcgis/services/Inspire/Pudni_typy/MapServer/WMSServer

ČÚZK (2015): Aplikace Analýzy výškopisu. [online]. 2015 [cit. 01. 6. 2019] Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(gkms31u1ewfojftdqrxlhnd\)\)/Default.aspx?mode=News&head_tab=sekce-00-gp&newsTyp=id&newsID=2459](https://geoportal.cuzk.cz/(S(gkms31u1ewfojftdqrxlhnd))/Default.aspx?mode=News&head_tab=sekce-00-gp&newsTyp=id&newsID=2459)

Geoportál INSPIRE (2019a): Ortofotomapa (50. léta), Ortofotomapy ČÚZK (aktuální). [online]. 2019 [cit. 02. 3. 2019] Dostupné z: <https://geoportal.gov.cz/web/guest/map>

Geoportál INSPIRE (2019b): Mapy 3. vojenského mapování. WMS služba. [online]. 2019 [cit. 02. 3. 2019] Dostupné z: <https://geoportal.gov.cz/web/guest/news?id=36742>

9. Seznam grafických prvků

9.1. Seznam obrázků

Obr. 2.1: Statisticky významné trendy klíčových parametrů vodní bilance v ČR v období 1961–2012

Obr. 2.2: Popis výpočetní sítě programu HEC-RAS

Obr. 2.3: Ilustrace výstupů z tabulky hydraulických vlastností vybrané buňky z 2D výpočetní sítě modelu HEC-RAS

Obr. 3.1: Lokalizace a základní přehled zájmového povodí Rožnovské Bečvy

Obr. 3.2: Geologické poměry zájmového povodí Rožnovské Bečvy

Obr. 3.3: Sklonitost svahů (nahore) a orientace svahů (dole) v zájmovém povodí Rožnovské Bečvy

Obr. 3.4: Podélný profil toku Rožnovská Bečva sestrojený podle DMR 5G za využití aplikace „Analýza výškopisu“ (ČÚZK, 2015) s lokalizací VD Horní Bečva a modelovaného území

Obr. 3.5: Rozsah zaplavení při povodni v červenci roku 1997 v povodí Bečvy na soutoku s řekou Morava

Obr. 3.6: Hydrogram průměrných denních průtoků na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

Obr. 3.7: Křivka překročení průměrných m-denních průtoků na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

Obr. 3.8: Průměrné měsíční průtoky na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

Obr. 3.9: Podíl měsíčních průtoků na celkovém odtoku na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

Obr. 3.10: Podíl průměrných měsíčních průtoků na ročním odtoku (nahore) a vývoj podílu měsíce března na průměrném ročním odtoku na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b) (dole)

Obr. 3.11: Průměrné roční průtoky s lineárním trendem (nahore) a součtová čára průměrných ročních průtoků na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017) (dole)

Obr. 3.12: Počet jednodenních a vícedenních povodní za jednotlivé měsíce na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

Obr. 3.13: Sezónnost jednodenních a vícedenních povodní na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

Obr. 3.14: Vícedenní povodňové události na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b) a jejich maximální hodnota Qd

Obr. 3.15: Kulminační průtoky povodňových událostí na stanici Valašské Meziříčí (ID 387000) uvedených v Povodňových zprávách překračující alespoň hodnotu Q1

Obr. 3.16: Zastoupení typů využití půdy na začátku 20. stol. a v roce 1997 v povodí Rožnovské Bečvy

Obr. 3.17: Změny v zalesnění pramenné oblasti povodí Rožnovské Bečvy na území obce Horní Bečva v 50. letech 20. stol

Obr. 3.18: : Příčný profil současného koryta Rožnovské Bečvy na 7.761 ř. km získaný z DMR 5G

Obr. 3.19: Schématická ukázka vývoje říčního vzoru řeky Rožnovská Bečva mezi 5,8 až 8,5 ř. km v období od let 1836–1852 do roku 2013

Obr. 3.20: Statisticky významné trendy vybraných parametrů vodní bilance a hodnot půdní vláhly povodí Rožnovské Bečvy

Obr. 3.21: Minimální roční průtoky (Qamin) (nahore) a počet dnů s průtoky menšími než Q355 (dole) na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

Obr. 3.22: Trendy průměrných ročních průtoků (Qa) na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

Obr. 3.23: Statisticky významný trend ($\alpha = 0,05$) variability Qd určená podle Cv Qd s p hodnotou (nahore) a korelace mezi Cv Qd a rozdílem Qamax a Qamin s korelačním koeficientem (r) (dole) na stanici Rožnov pod Radhoštěm (386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

Obr. 3.24: Statisticky významné trendy ($\alpha = 0,05$) hodnot Qamax (nahore) a rozdílů Qamax a Qamin (dole) s p hodnotami na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

Obr. 3.25: Návrhy PBPPPO na toku Rožnovské Bečvy v rámci projektu “Bečva“

Obr. 3.26 Návrhy PPO opatření v povodí Rožnovské Bečvy podle aktualizované Studie PPO na území Zlínského kraje z roku 2012–2013

Obr. 3.27: Návrh retenčních opatření v říční nivě Rožnovské Bečvy Studií PPO na území Zlínského kraje a plánovaných opatření v ÚP města Valašské Meziříčí a obce Zašová

Obr. 3.28 Návrh retenčních opatření v říční nivě Rožnovské Bečvy Studií PPO na území Zlínského kraje a plánovaných opatření v ÚP obce Zašová, Stráž nad Bečvou a města Zubří

Obr. 3.29: Návrh retenčních opatření v říční nivě Rožnovské Bečvy Studií PPO na území Zlínského kraje a plánovaných opatření v ÚP obce Dolní Bečva a ÚP Prostřední Bečva.

Obr. 4.1: Dílčí výstupy bakalářské práce autory obsahující inventarizaci vodních náhonů (protékané, zaniklé) v zájmovém povodí Rožnovské a Vsetínské Bečvy

Obr. 4.2: Využití výsledků pomocné simulace v programu HEC-RAS pro určení revitalizačního návrhu trasy náhonu (nahore)

Obr. 4.3: Podklady III. vojenského mapování pro návrh vinutí nového koryta

Obr. 4.4: Schéma situace s revitalizačními návrhy pro Úsek I a Úsek III a zachovaným korytem původního náhonu (Úsek II) vybraného modelovaného území

Obr. 4.5: Lokalizace měřených profilů (křížky) pro úpravu DMR (nahore). Terénní měření příčných profilů na Hrachoveckém náhonu (nezařazen do modelovacího procesu) (dole).

Obr. 4.6: Ukázka prostředí grafického editoru softwaru HEC-RAS pro správu geometrie

Obr. 4.7: Ilustrace výpočetní sítě v modelovaném území sloužící k provedení 2D hydraulické simulace v programu HEC-RAS

Obr. 4.8: Sada 17 řad hodinových průtoků sloužící ke zhodnocení efektu revitalizačních opatření na změnu retence vody v říční nivě

Obr. 4.9: Pozorované hydrogramy povodňových událostí 1997 (nahore) a 2007 (dole) na stanicích Valašské Meziříčí a Rožnov pod Radhoštěm sloužící k výpočtu hydrogramu určeného jako horní okrajová podmínka modelu

Obr. 4.10: Výpočetní kroky v programu ArcMap k získání hodnot zatopených objemů v říční nivě

Obr. 4.11: Ukázka tabulárního vyjádření staničení a hladin nadmořských výšek podélného profilu v modelovaném úseku koryta Rožnovské Bečvy mezi 5,555 ř. km – 8,781 ř. km v prostředí RasMapper

Obr. 4.12: Výsledky citlivostní analýzy okrajové podmínky normální hloubky v modelu HEC-RAS s polohami nadmořských výšek hladin na počátku modelovaného úseku při hraničních hodnotách normální hloubky (0.006 a 0.003)

Obr. 5.1: Konfrontace výsledků inventarizace vodních náhonů v povodí Vsetínské a Rožnovské Bečvy s návrhy opatření protipovodňové studie Zlínského kraje

Obr. 5.2: Vybrané modelované území mezi 5,555 ř. km – 8,781 ř. km Rožnovské Bečvy v obci Zašová s tokem Rožnovské Bečvy a zkoumaným náhonem (nahore). Současné využití půdního povrchu (dole).

Obr. 5.3: Stavidlo na počátku náhonu na 8,301 ř. km Rožnovské Bečvy (nahore). Charakter koryta náhonu a doprovodné vegetace na jeho 1.035 ř. km (dole).

Obr. 5.4: Zemědělsky využívaná říční niva v okolí první poloviny náhonu (nahore). Charakter koryta náhonu a doprovodné vegetace v lokalitě zástavby na 0.225 ř. km náhonu (dole).

- Obr. 5.5:** Příčné profily pro původní situace koryta náhonů a situace návrhů revitalizací koryta náhonu
- Obr. 5.6:** Podélné profily pro původní situaci koryta náhonu, návrhů revitalizací koryta náhonu s hodnotou sklonu koryta v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy
- Obr. 5.7:** Závislost průtoků v Úseku I na průtocích v Rožnovské Bečvě (nahore) a podíl průtoků v Úseku I na průtocích v Rožnovské Bečvě (dole) na 8.458 ř. km
- Obr. 5.8:** Digitální model reliéfu (DMR) pro původní situaci morfologie vodního náhonu beze změny (nahore). DMR s návrhy revitalizačních úprav náhonu (dole) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy.
- Obr. 5.9:** Varianty změny využití povrchu v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy pro návrh revitalizačních úprav v oblasti navrženého koryta náhonu
- Obr. 5.10:** Rozložení hodnot objemů zatopeného prostoru říční nivy v závislosti na hodnotách průtoků pro simulaci původní situace (ORIGopt) a simulace návrhů revitalizačních úprav (LU I, LU II, LU III) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy
- Obr. 5.11:** Prokazatelné absolutní (nahore) a procentuální změny objemů (dole) v zatopeném prostoru říční nivy pro varianty revitalizačních úprav (LU I, LU II, LU III) proti původní situaci (ORIGopt) pro simulovaný průtok 100 m³.s⁻¹ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy
- Obr. 5.12:** Prostorové znázornění změn hloubek mezi původní situací a variantou LU III revitalizačních úprav při simulovaném průtoku 100 m³.s⁻¹ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy
- Obr. 5.13:** Rozložení hodnot plochy zatopeného prostoru říční nivy v závislosti na hodnotách průtoků pro simulaci původní situace (ORIGopt) a simulace návrhů revitalizačních úprav (LU I, LU II, LU III) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy
- Obr. 5.14:** Prokazatelné absolutní (nahore) a procentuální změny (dole) v rozsahu zatopené plochy v prostoru říční nivy variant revitalizačních úprav (LU I, LU II, LU III) proti původní situaci (ORIGopt) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy
- Obr. 5.15:** Výsledky rozsahu plochy zaplavení pro simulaci průtoku 100 m³.s⁻¹ původní situace (nahore) a varianty LU III revitalizačních úprav (dole) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy
- Obr. 5.16:** Výsledky rozsahu plochy zaplavení pro simulaci průtoku 400 m³.s⁻¹ původní situace (nahore) a varianty LU III revitalizačních úprav (dole) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy
- Obr. 5.17:** Rozložení simulovaných nadmořských výšek hladin v korytě Rožnovské Bečvy při průtoku 100 m³.s⁻¹ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy
- Obr. 5.18:** Absolutní rozdíly výsledků simulací nadmořských výšek hladin v korytě Rožnovské Bečvy pro návrhy revitalizačních opatření (LU I, LU II, LU III) od výsledků původní situace při simulovaném průtoku 100 m³.s⁻¹ (nahore). Prokazatelné absolutní změny v poloze nadmořských výšek hladin v korytě Rožnovské Bečvy pro návrhy revitalizačních opatření (LU I, LU II, LU III) při průtoku 100 m³.s⁻¹ (dole) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy.
- Obr. 5.19:** Rozložení simulovaných nadmořských výšek hladin v korytě Rožnovské Bečvy při průtoku 400 m³.s⁻¹ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy
- Obr. 5.20:** Absolutní rozdíly výsledků simulací nadmořských výšek hladin v korytě Rožnovské Bečvy pro návrhy revitalizačních opatření (LU I, LU II, LU III) od výsledků původní situace při simulovaném průtoku 400 m³.s⁻¹ (nahore). Prokazatelné absolutní změny v poloze nadmořských výšek hladin v korytě Rožnovské Bečvy pro návrhy revitalizačních opatření (LU I, LU II, LU III) při průtoku 400 m³.s⁻¹ (dole) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy.
- Obr. 5.21:** Rozložení simulovaných rychlostí proudění v korytě Rožnovské Bečvy při průtoku 100 m³.s⁻¹ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy
- Obr. 5.22:** Rozložení simulovaných rychlostí proudění v korytě Rožnovské Bečvy při průtoku 400 m³.s⁻¹ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Obr. 5.23: Absolutní rozdíly výsledků simulací rychlostí proudění v korytě Rožnovské Bečvy pro návrhy revitalizačních opatření od výsledků původní situace při průtoku 100 m³.s⁻¹ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Obr. 5.24: Prokazatelné absolutní (nahore) a procentuální změny (dole) rychlostí proudění v korytě Rožnovské Bečvy variant revitalizačních opatření úprav proti původní situaci při simulovaném průtoku 100 m³.s⁻¹ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy.

Obr. 5.25: Výsledky simulace rychlosti proudění při průtoku 100 m³.s⁻¹ pro původní situace (nahore) a pro variantu revitalizační úpravy LU I (dole) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Obr. 5.26: Absolutní rozdíly výsledků simulací rychlostí proudění v korytě Rožnovské Bečvy pro návrhy revitalizačních opatření od výsledků původní situace při průtoku 400 m³.s⁻¹ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Obr. 5.27: Prokazatelné absolutní (nahore) a procentuální změny (dole) rychlostí proudění v korytě Rožnovské Bečvy revitalizačních úprav (LU I, LU II, LU III) proti původní situaci (ORIGopt) pro simulovaný průtok 400 m³.s⁻¹ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Obr. 5.28: Rychlosti proudění při simulaci průtoků 400 m³.s⁻¹ pro variantu původní situace (nahore) a variantu revitalizačních úprav LU III (dole) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Obr. 5.29: Vybrané profily a jejich staničení pro analýzu změn kulminačních průtoků za využití hydrogramů povodňových situací z let 1997 a 2007 v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Obr. 5.30: Hydrogramy simulací tří variant revitalizačních úprav (nahore) a prokazatelné transformace kulminačních průtoků (dole) na 2.4 ř. km za povodně z roku 1997 v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Obr. 5.31: Hydrogramy simulací tří variant revitalizačních úprav (nahore) a prokazatelné transformace kulminačních průtoků (dole) na 0.8 ř. km za povodně z roku 1997 v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Obr. 5.32: Hydrogramy simulací tří variant revitalizačních úprav (nahore) a prokazatelné transformace kulminačních průtoků (dole) na 0.7 ř. km za povodně z roku 1997 v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Obr. 5.33: Hydrogramy simulací tří variant revitalizačních úprav (nahore) a prokazatelné transformace kulminačních průtoků (dole) na 2.8 ř. km za povodně z roku 2007 v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Obr. 5.34: Hydrogramy simulací tří variant revitalizačních úprav (nahore) a prokazatelné transformace kulminačních průtoků (dole) na 2.7 ř. km za povodně z roku 2007 v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Obr. 5.35: Hydrogramy simulací tří variant revitalizačních úprav (nahore) a prokazatelné transformace kulminačních průtoků (dole) na 0.7 ř. km za povodně z roku 2007 v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

9.2. Seznam tabulek

Tab. 3.1: Geomorfologické členění zájmového povodí Rožnovské Bečvy dle Demka a Mackovičina (2006)

Tab. 3.2: Klimatické oblasti v povodí Rožnovské Bečvy dle klasifikace Quitta za období 1961–2000 (KVĚTOŇ et al., 2011)

Tab. 3.3: Základní charakteristiky toku Rožnovská Bečva a jeho povodí

Tab. 3.4: Základní údaje o útvarech podzemních vod v povodí Rožnovské Bečvy a jejich přírodních charakteristikách (PDP, 2015)

Tab. 3.5: Základní průměrné roční odtokové poměry řeky Rožnovská Bečva na stanici Rožnov pod Radhoštěm, povodí Moravy, Bečvy a celorepublikového průměru (HORSKÝ et al., 1970)

Tab. 3.6: N-leté průtoky na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000)

Tab. 3.7: M-denní průtoky na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

Tab. 3.8: Počet povodňových událostí za jednotlivé měsíce na stanici Rožnov pod Radhoštěm (ID 386000) za období 1952–2010 (ČHMÚ, 2017b)

Tab. 4.1: Zdroje podkladů a dat sloužící pro výběr zájmového území, návrh profilů revitalizovaného náhonu a 2D hydraulický model

Tab. 4.2: Hodnoty drsnostního koeficientu povrchu použité pro vybrané typy povrchu vstupující do hydraulického modelu (BRUNNER, 2016b)

Tab. 5.1: Vstupní parametry a výsledné hodnoty průtočné kapacity pro původní Úsek I a II

Tab. 5.2: Vstupní parametry a vypočtené hodnoty průtočné kapacity pro profily navrhovaných Úseků I a III

Tab. 5.3: Parametry příčných a podélných profilů původních Úseků I a II a úseků s revitalizačními návrhy (Úsek I a III)

Tab. 5.4: Procentuální podíl jednotlivých typů využití půdy pro původní situaci (LU_{orig}) a varianty návrhů revitalizačních úprav (LU I, LU II, LU III) v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Tab. 5.5: Maximální dosažené hodnoty objemů zatopeného prostoru říční nivy pro jednotlivé varianty simulací v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Tab. 5.6: Největší prokazatelné změny objemů zaplaveného prostoru říční nivy pro jednotlivé simulace revitalizačních opatření při průtoku 100 m³.s⁻¹ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Tab. 5.7: Maximální dosažené hodnoty plochy zatopeného prostoru říční nivy pro jednotlivé varianty simulací v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Tab. 5.8: Největší prokazatelné změny ploch zatopeného prostoru říční nivy pro jednotlivé simulace revitalizačních opatření v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Tab. 5.9: Nejvýznamnější prokazatelné změny výšek hladin v korytě Rožnovské Bečvy pro jednotlivé simulace revitalizačních opatření při průtocích 100 m³.s⁻¹ a 400 m³.s⁻¹ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Tab. 5.10: Nejvýznamnější prokazatelné změny rychlostí proudění v korytě Rožnovské Bečvy pro simulace průtoku 100 m³.s⁻¹ a 400 m³.s⁻¹ v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy

Tab. 5.11: Prokazatelné transformace kulminačních průtoků ve vybraných profilech v modelovaném úseku mezi 5.555 ř. km – 8.781 ř. km Rožnovské Bečvy pro hydrogramy povodní z let 1997 a 2007

9.3. Seznam příloh

Příloha 1.1.: Výpočetní síť současné situace terénu mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy sloužící k provedení 2D hydraulického simulace v programu HEC–RAS

Příloha 1.2.: Výpočetní síť s revitalizační úpravou mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy sloužící k provedení 2D hydraulického simulace v programu HEC–RAS

Příloha 1.3.: Preferenční cesty proudění určené z výsledků pomocné simulace v programu HEC–RAS pro určení trasy revitalizačního návrhu koryta mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 1.4.: Preferenční cesty proudění určené z výsledků pomocné simulace v programu HEC–RAS včetně trasy revitalizačního návrhu koryta mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 2.1.: Srovnání původní trasy koryta náhonu a návrhu nové trasy koryta mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 2.2.: Původní situace terénu bez revitalizačního návrhu koryta mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 2.3: Situace terénu s návrhem nové trasy koryta mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 3.1: Původní situace využití povrchu mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 3.2.: Varianta změny využití povrchu LU I v rámci návrhu revitalizačních úprav mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 3.3.: Varianta změny využití povrchu LU II v rámci návrhu revitalizačních úprav mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 3.4.: Varianta využití povrchu LU III v rámci návrhu revitalizačních úprav mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 4.1.: Změna hloubek mezi původní situací a variantou revitalizačních úprav LU III při simulovaném průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 4.2.1.: Výsledky rozsahu a hloubky zaplavení při simulovaném průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro původní situaci mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 4.2.2.: Výsledky rozsahu a hloubky zaplavení při simulovaném průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro variantu LU I mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 4.2.3.: Výsledky rozsahu a hloubky zaplavení při simulovaném průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro variantu LU II mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 4.2.4.: Výsledky rozsahu a hloubky zaplavení při simulovaném průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro variantu LU III mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 4.3.1.: Výsledky rozsahu a hloubky zaplavení při simulovaném průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro původní situaci mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 4.3.2.: Výsledky rozsahu a hloubky zaplavení při simulovaném průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro variantu LU I mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 4.3.3.: Výsledky rozsahu a hloubky zaplavení při simulovaném průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro variantu LU II mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 4.3.4.: Výsledky rozsahu a hloubky zaplavení při simulovaném průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro variantu LU III mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 4.4.1.: Výsledky rychlostí proudění při simulovaném průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro původní situaci mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 4.4.2.: Výsledky rychlostí proudění při simulovaném průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro variantu LU I mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 4.4.3.: Výsledky rychlostí proudění při simulovaném průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro variantu LU II mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 4.4.4.: Výsledky rychlostí proudění při simulovaném průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro variantu LU III mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 4.5.1.: Výsledky rychlostí proudění při simulovaném průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro původní situaci mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 4.5.2.: Výsledky rychlostí proudění při simulovaném průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro variantu LU I mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 4.5.3.: Výsledky rychlostí proudění při simulovaném průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro variantu LU II mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

Příloha 4.5.4.: Výsledky rychlostí proudění při simulovaném průtoku $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro variantu LU III mezi 5,555–8,781 ř. km Rožnovské Bečvy

10. Přílohy